

Georgia de Barros

**DISTRIBUIÇÃO DOS NUTRIENTES E FIXAÇÃO DO
CARBONO EM UMA LAGUNA SUBTROPICAL FORMADORA
DE ZONA ANÓXICA (LAGOA DA CONCEIÇÃO/SC)**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Geografia da Universidade Federal
de Santa Catarina, como requisito
parcial a obtenção de título de
mestre em Geografia.
Orientadora: Dra. Alessandra L.
Fonseca

Florianópolis
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

De Barros, Georgia

DISTRIBUIÇÃO DOS NUTRIENTES E FIXAÇÃO DO CARBONO EM UMA
LAGUNA SUBTROPICAL FORMADORA DE ZONA ANÓXICA (LAGOA DA
CONCEIÇÃO/SC) / Georgia De Barros ; orientadora,
Alessandra Larissa Fonseca - Florianópolis, SC, 2015.
133 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas. Programa
de Pós-Graduação em Geografia.

Inclui referências

1. Geografia. 2. Dinâmica do Carbono. 3. Nutrientes. 4.
Zona anóxica. 5. laguna subtropical, Brasil. I. Larissa
Fonseca, Alessandra. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Geografia. III. Título.

Folha de aprovação da banca

Dedico este trabalho a Vida Marinha.

“Boiado por água ele pode voar em qualquer direção, para cima, para baixo, para o lado. Por mero sacudir sua mão. Por água, o homem torna-se um arcanjo” (Jacques Yves Cousteau).

AGRADECIMENTOS

Esse momento para mim é um dos mais importantes, pois sem esses “seres” eu não conseguiria desenvolver esta pesquisa! Então....

Agradeço profundamente minha querida orientadora Dr^a. Alessandra Larissa Fonseca por acreditar em meu potencial em desenvolver um trabalho como este. Sou grata por sua paciência única em ensinar, por sua amizade, humanidade e principalmente por ter feito uma grande diferença em meu aprimoramento profissional e pessoal desde o momento em que te conheci (8 anos!!) . “Tia Ale” admiro muito você. Thank you very much!

A todos do NEMAR (Edu, Paulinho, Gi, Simão, Paulo Manso, Tião e os queridos alunos que tive o privilégio de conhecer) pela atenção, ajuda, conversas descontraídas e ao mesmo tempo muito produtivas e por sempre estarem de portas abertas!!! Minha segunda casa. Muuiitooo obrigada galera.

Ao Prof. Dr. Paulo Horta e toda equipe (Cintia, Vanessa, Dudu, Manu, Helen, etc.) pela disposição em ajudar, seja com equipamentos, água destilada, espaço físico e bom humor sempre. Muito obrigada mesmo Paulo você é único.

Ao Prof. Dr. Leonardo Rubi Rörig por ter sido membro da qualificação e defesa final desta pesquisa e por sempre esclarecer dúvidas, pelo empréstimo de materiais e pela sua disponibilidade e da sua equipe. MUITO OBRIGADA Léo!

Ao Prof. Dr. Maurício Petrucio, por ter aceitado participar da qualificação deste trabalho, pela paciência em sempre emprestar seus equipamentos e esclarecimentos de dúvidas. Você é excelente profissional e um ser maravilhoso!

Aos Profs. Dr. Nei Leite e Dr. Jurandir Pereira Filho por terem aceitado participar como membros da banca da defesa deste trabalho. Muito Obrigada!

A Profa. Dra. Carla Bonetti, pela dedicação e carinho para que minha defesa de qualificação fosse realizada. Muito Obrigada Carla.

Ao Prof. Dr. Jarbas Bonetti, pelo fornecimento dos dados meteorológicos da estação do LOC, mesmo estando do outro lado mundo.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado e suporte financeiro para o desenvolvimento do projeto 484956/2012-4.

Aos técnicos Félix Rosumek e Carla Simões, pela paciência e confiança em me deixar usar o laboratório e por sempre cuidarem da queima dos meus “filhinhos” (filtros). Vocês são grandes profissionais e amigos.

A equipe da Cultura Subaquática (Dudu, George e marinheiros), pelo trabalho exemplar e por nunca faltarem com o compromisso. Foi ótimo trabalhar com vocês. Muito Obrigada galera do mar!!

A querida amiga Andreza Rigotti por sempre estar disponível em responder minhas dúvidas, ouvir os queixumes com tanto carinho e pelo apoio e consideração. Você realmente é AMIGA!!! Muito Obrigada mesmo!

Aos amigos Denise Tonetta e Pablo pela força, estímulo, risadas e por toda ajuda no decorrer desta caminhada. Adoro vocês.

Ao Alex Cabral Santos, meu parceiro de campo e laboratório, você é uma figura e ótimo profissional. Sem sua ajuda teria sido “complicated”. Valeu!

As Meninas da secretaria da PPGG Helena e Renata Costa Silvério, que tanto esclareceram minhas dúvidas e receberam tantas caixas de materiais, mas principalmente por serem sempre “leves”. Mil obrigadas!!

Especialmente aos meus pais (Paulo e Liciane), pela base, educação, força, por sempre acreditarem que sou capaz, enfim pelo amor, um tanto exigente, mas que sem vocês eu não estaria aqui e nem seria quem sou. Amo muito cada um de vocês.

A um anjo especial, minha irmã querida (Valéria), pelas piadas, longos telefonemas de desabafo, pelo suporte emocional e por sempre cuidar de mim, mesmo a distância. Sem palavras alma gêmea! Te amo.

Aos grandes amigos (Nixon, Pierri e Maria), por toda dedicação em cuidar e acreditar em mim. Vocês sabem o quanto são especiais na minha vida.

Aos meus amigos do mar que sem vocês não sou eu. Vocês fazem parte da minha essência e identidade. Aloha galera!!

Não podia deixar de agradecer a 5 criaturinhas de 4 patas (Zimbábue, Zion, Jack, Tiririca e Pretinha), pela alegria, brincadeiras, “barulhos” quando tinha que me concentrar, mas que por um lado fizeram toda a diferença. Este amor

incondicional que me faz aprender a cada dia que passo com eles. Com certeza são os melhores amigos.

E finalmente, ao Universo, por permitir que eu estude e viva com a Natureza, em especial o Oceano.

RESUMO

As mudanças globais irão aumentar a frequência e a expansão das zonas anóxicas em sistemas costeiros, o que irá prejudicar severamente qualquer tipo de vida aquática de interesse comercial (peixes e invertebrados). A região Central (CCL) da Lagoa da Conceição (LC) apresenta estratificação física da coluna d' água permanente e eventos sazonais de hipoxia e/ou anoxia, principalmente no período pós-verão, onde a matéria orgânica é decomposta. Este trabalho foi organizado em 2 capítulos e teve como objetivos: 1- caracterizar a estrutura física da coluna d' água relacionando com a dinâmica de nutrientes na região. 2- Quantificar o estoque das diferentes formas de carbono (orgânico e inorgânico dissolvido) nas diferentes massas de água da CCL. 3- Avaliar a distribuição espaço-temporal da fixação de carbono nas diferentes condições de oxirredução da coluna d' água lagunar. 4- Estimar o fluxo do CO₂ na interface atmosfera-água e relacionar com as condições metabólicas do sistema. As amostragens foram realizadas em triplicata nos períodos de verão, outono e inverno em três pontos amostrais ao longo da CCL. Os eventos de hipoxia e/ou anoxia foram observados somente no verão, onde o índice de estratificação da coluna d' água foi maior e houve ausência de luz nas águas de fundo. O uso aparente do oxigênio (AOU) indicou águas supersaturadas de OD na superfície, o que esteve associado aos processos de produção e insaturadas deste gás nas águas de haloclina e fundo, onde os processos de mineralização dominam. A intensidade dos ventos e a intrusão de massas de águas foram os principais fatores reguladores da renovação das águas de fundo, fato observado no inverno. Os nutrientes apresentaram diferenças temporais, com as maiores concentrações ocorrendo no inverno, evidenciando o processo de remineralização da matéria orgânica (MO) no sistema. Um pico de fosfato (0,5 µM) foi encontrado nas águas de fundo neste período que possivelmente está relacionado a intrusão da Pluma do Rio da Prata (PRP) na LC. Neste estudo, o sistema foi limitante de fósforo e o amônio foi a forma de nutriente que predominou. Os resultados do segundo capítulo mostraram que a CCL agiu como sumidouro de CO₂. A fixação do carbono (C) no claro (PPL) nas águas de superfície foi mais elevada no verão. A clorofila (Chl-a), PAR e o silicato, foram as variáveis que melhor se relacionaram

com a PPL nesta massa de água. Nas águas de fundo do inverno e outono, onde a zona fótica atingiu toda coluna d' água, a PPL foi em média a mais elevada do estudo ($235,6 \pm 145,0$ e $208,8 \pm 59,2 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$). A fixação do carbono no escuro (PPD) predominou nas águas de fundo no verão representando 21% da fixação total. O carbono orgânico dissolvido (COD) e particulado (COP) das águas de superfície e fundo se correlacionaram positivamente, indicando possível acoplamento e foram os responsáveis pela síntese da MO principalmente no verão, onde foram observadas as maiores concentrações, diminuindo para os demais períodos. Neste estudo a elevada carga de MO produzida nas águas de superfície e depositada no fundo no verão, contribuíram para as condições hipóxicas observadas, além da ausência de luz e do maior índice de estratificação da coluna d' água. As águas de fundo no outono e inverno apresentaram as maiores concentrações de carbono inorgânico dissolvido (CID) e da pressão parcial do CO_2 (pCO_2), evidenciando processos de mineralização. As baixas concentrações de COD no outono e inverno podem estar relacionadas com a produção secundária. O COP que permaneceu no sistema é um indicativo de MO refratária.

Palavras-chave: Anoxia. Ventos. Fixação do carbono. Matéria orgânica. Fluxos carbono orgânico.

ABSTRACT

Global change will increase the frequency and the expansion of anoxic zones in coastal systems, which will severely affect any aquatic life of commercial interest (fish and invertebrates). The central region (CCL) of Lagoa da Conceição (LC) has permanent physical stratification of the water column and seasonal events of hypoxia and/or anoxia, especially in the post-summer period, where the organic matter is decomposed. The paper was organized in two chapters and the aims were: 1- characterize the physical structure of the water column relating to nutrient dynamics in the region. 2- Quantify the stock of the different forms of carbon (organic and inorganic dissolved) in different water masses of the CCL. 3- To evaluate the carbon sequestration of spatial- temporal distribution in the different redox conditions at the water column of lagoon. 4- To estimate the flux of CO₂ in the air-water interface and relate to metabolic conditions of the system. Sampling was carried out in triplicate in summer, fall and winter at three sampling points along the CCL. Hypoxia and/or anoxic events were observed only in the summer, where the stratification index of water column was higher and the photic zone didn't reach the bottom waters. The apparent oxygen utilization (AOU) indicated DO supersaturation water on the surface, which was associated with the production process and unsaturated of this gas in the halocline and bottom waters where the mineralization processes dominate. The intensity of the winds and the water mass intrusion were the main factors regulating renewal of bottom waters, which was observed in winter. The nutrients distributions showed temporal differences with the highest concentrations occurring in the winter, showing the remineralization process of organic matter (OM) in the system. A phosphate peak (0.5 mM) was found in bottom waters in this period which is possibly related to intrusion of the Plata River Plume (PRP) in the LC. In this study, the system was phosphorus limited and ammonium was the predominant form of nutrient. The results showed that the second chapter CCL acts as sink. The carbon sequestration (C) on light (PPL) in surface water was higher in summer. The chlorophyll (Chl-a), PAR and the silicate were the variables that best correlated with the PPL in this water mass. Bottom waters in winter and autumn, where the photic zone reached all the water column, the PPL was on average the

highest in the study (235.6 ± 145.0 and 208.8 ± 59.2 mg C m³ h⁻¹). The carbon sequestration in the dark (PPD) prevailed in bottom water in the summer representing 21% of total fixation. Dissolved organic carbon (DOC) and particulate (COP) of surface and bottom waters were positively correlated, indicating a possible coupling and were responsible for the synthesis of OM especially in the summer, where the highest concentrations were observed, decreasing for the other periods. In this study the high OM load produced in surface and deposited in the bottom waters in summer, contributed to the hypoxic conditions, in addition to the absence of light and the highest stratification index of water column. The bottom waters in autumn and winter showed the highest concentrations of dissolved inorganic carbon (DIC) and the partial pressure of CO₂ (pCO₂), showing mineralization processes. The low COD concentration in autumn and winter could be related to the secondary production. The COP remaining in the system is indicative of refractory OM.

Keywords: Anoxia. Winds. Carbon sequestration. Organic matter. Fluxes. Organic carbon.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1:

- Figura 1** - Localização das estações amostrais na região central da Lagoa da Conceição (SC), Brasil..... **35**
- Figura 2** - Valores médios diário da velocidade dos ventos (m.s⁻¹) e da precipitação (mm) nos cinco dias precedentes a amostragem (preto) e durante o dia de coleta (cinza) na região central da LC (SC) no período de verão, outono e inverno de 2014..... **40**
- Figura 3** - Mediana, quartis, mínimo e máximo do Índice de estratificação (Kg m³) no verão (21/1, 05/2, 25/2), outono (08/5, 15/5, 27/5) e inverno (10/7, 30/7, 14/8) de 2014 na região central da LC (SC)..... **41**
- Figura 4** - Mediana, quartis, mínimo e máximo da concentração da Radiação Fotossintética Ativa ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), oxigênio dissolvido OD (mg.L⁻¹) e Utilização aparente do oxigênio (%) nas águas de superfície, haloclina e fundo da região central da LC (SC) no verão (21/1, 05/2, 25/2) outono (08/5, 15/5, 27/5) e inverno (10/7, 30/7, 14/8) de 2014..... **44**
- Figura 5** - MDS entre as variáveis físico-químicas e químicas com amostras de água de 3 profundidades: superfície (branco), haloclina (cinza) e fundo (preto) no verão (▲), outono (▼) e inverno (●) na região central da LC (SC) em 2014..... **50**

CAPÍTULO 2:

- Figura 6** - Localização do ponto amostral (27°35'57,8 S e 48°26'50,4 O) na região Central da Lagoa da Conceição (●), leste da ilha de Santa Catarina, Florianópolis (SC)..... **75**
- Figura 7** - Valores de fluxos de CO₂ (mmol m⁻² d⁻¹) na interface ar-água nos períodos de verão (21/1, 05/2, 25/2), outono (08/5, 15/8, 27/5) e inverno (10/7, 30/7, 14/8) na região central da LC (SC). Valores negativos indicam fluxo da atmosfera para a coluna d'água..... **84**
- Figura 8** - Distribuição da utilização aparente do oxigênio (AOU%), pressão parcial do CO₂ na coluna d'água (pCO₂ μatm), carbono inorgânico dissolvido (CID μM), carbono orgânico total

(COT μM), carbono orgânico dissolvido (COD μM), carbono orgânico particulado (COP μM), fixação do carbono no claro (PPL $\text{mg C m}^{-3} \text{h}^{-1}$) e fixação do carbono no escuro (PPD $\text{mg C m}^{-3} \text{h}^{-1}$) nas águas de superfície, haloclina e fundo na região central da LC (SC) em 2014. Os períodos estão representados em dias. . **87**

Figura 9 - Perfil da distribuição da temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidade (PSU), PAR (%) e oxigênio dissolvido (mg L^{-1}) a cada 0,5 (m) da coluna d' água na região central da LC (SC) em 2014. Os períodos estão representados em dias julianos. A linha tracejada representa o limite da zona eufótica. **90**

Figura 10 - MDS entre as variáveis físico-químicas, químicas e biológicas das amostragens realizadas em 3 profundidades: superfície (branco), haloclina (cinza) e fundo (preto) no verão (\blacktriangle), outono (\blacksquare) e inverno (\bullet) na Região Central da LC (SC) em 2014..... **93**

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1:

Tabela 1 - Média (\pm DS) da temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidade (psu) e da PAR (%) nas águas de superfície, haloclina e fundo da região central da LC (SC) nos períodos de verão (21/01, 05/02, 25/02), outono (08/5, 15/8, 27/5) e inverno (10/7, 30/7, 14/8) de 2014.. **42**

Tabela 2 - Concentração média (\pm DS) de nitrato (NO_3^-), amônio (NH_4^+), fosfato (PO_4^{3+}), silicato (SiO_2), razão N/P, Cloro-a e Feo nas águas de superfície, haloclina e fundo da região central da LC (SC) nos períodos de verão (21/01, 05/02, 25/02), outono (08/05, 15/08, 27/05) e inverno (10/07, 30/07, 14/08) de 2014.. **46**

Tabela 3 - Resultados da análise permutacional multivariada (PERMANOVA) das variáveis físico-químicas (T° , salinidade, PAR, OD, Chl-a e Feo) entre as diferenças de períodos (verão (ver), outono (out) inverno (inv)) e profundidades (superfície (s), haloclina (h) e fundo (z)) na região central da LC (SC) em 2014.

..... **48**

Tabela 4 - Resultados da análise permutacional multivariada (PERMANOVA) dos nutrientes (NO_3^- (μM), NH_4^+ (μM), PO_4^{3+} (μM) e SiO_2 (μM)) entre as diferenças dos períodos (verão (ver), outono (out) e inverno (inv)) e profundidades (superfície (s), haloclina (h) e fundo (z)) na região central da LC (SC) em 2014.

..... **49**

CAPÍTULO 2:

Tabela 5 - Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre as variáveis físico-químicas determinantes para os eventos de hipoxia e/ou anoxia na região central da LC (SC). **89**

Tabela 6 - Concentração média ($\pm\text{dp}$) de nitrato (NO_3^-), amônio (NH_4^+), fosfato (PO_4^{3+}), silicato (SiO_2), razão N/P, Cloro-a ($\mu\text{g L}^{-1}$) e Feo-a ($\mu\text{g L}^{-1}$) nas águas de superfície (S), haloclina (H) e fundo (F) da região central da LC (SC) nos períodos de verão, outono e inverno de 2014..... **91**

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 OBJETIVOS	27
1.1.1 Geral	27
1.1.2 Específicos.....	28
2 CAPÍTULO 1 - DISTRIBUIÇÃO DOS NUTRIENTES INORGÂNICOS EM UMA LAGUNA RASA SUBTROPICAL NO SUL DO BRASIL COM EVENTOS SAZONAIS DE HIPOXIA...	29
RESUMO	31
2.1 INTRODUÇÃO	32
2.2 MATERIAIS E MÉTODOS	35
2.2.1 Área de Estudo	35
2.2.2 Atividade em Campo.....	37
2.2.3 Análise dos Dados	38
2.3 RESULTADOS	39
2.3.1 Climatologia.....	39
2.3.2 Variáveis Físico-Químicas.....	40
2.3.3 Nutrientes Inorgânicos Dissolvidos e Pigmentos Fotossintéticos	44
2.3.4 Análises Estatísticas.....	47
2.4 DISCUSSÃO	50
REFERÊNCIAS	58
3 CAPÍTULO 2 - DINÂMICA DO CARBONO EM UMA LAGUNA ESTRATIFICADA NO SUL DO BRASIL.....	67
RESUMO	69
3.1 INTRODUÇÃO	70

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS	73
3.2.1 Área de Estudo.....	73
3.2.2 Desenho Amostral e Análises	75
3.2.3 Fixação do Carbono pelo Método do Isótopo Estável ¹³C	76
3.2.4 Carbono Orgânico Total (COT), Orgânico Dissolvido (COD) e Inorgânico Dissolvido (CID)	78
3.2.5 Pigmentos Fotossintetizantes e Nutrientes Inorgânicos	79
3.2.6 Fluxo do CO₂ na Interface Ar-Água.....	80
3.2.7 Análise dos Dados	81
3.3 RESULTADOS	82
3.3.1 Dinâmica do Carbono	82
3.3.2 pCO₂ na coluna D'água e Fluxos de CO₂ na Interface Ar-Água.....	83
3.3.3 Fixação do Carbono na Luz.....	85
3.3.4 Fixação do Carbono no Escuro.....	86
3.3.5 Variáveis Físico-Químicas e Nutrientes	88
3.4 DISCUSSÃO	93
REFERÊNCIAS.....	104
4 CONCLUSÃO FINAL	115
REFERÊNCIAS.....	117
ANEXO A - Cálculo para Determinar a Fixação do C pelo Método do ¹³C	131

1 INTRODUÇÃO

Os ecossistemas costeiros, lagunas e estuários, são áreas de transição entre os ambientes terrestres e oceânicos e estão entre os sistemas aquáticos mais produtivos do mundo, devido ao aporte de nutrientes, elevada biomassa e aos complexos processos biogeoquímicos e suas interações com os sedimentos (Billen et al., 1991; Nixon, 1995; McGlathery et al., 2001; Lloret, 2008). Possuem várias funções importantes como sítios de ciclagem de nutrientes, exportadores de matéria orgânica e de nitrogênio e fósforo inorgânico para os oceanos oligotróficos adjacentes. Também são considerados como berçários para inúmeras espécies de organismos marinhos de interesse comercial para a pesca e o extrativismo. (Gönenç; Wolflin, 2005; Canuel et al., 2012).

Em estuários e lagunas, a variabilidade temporal e espacial da produção primária, processo de síntese da matéria orgânica, é dependente da disponibilidade de nutrientes provenientes da bacia de drenagem e da sua reciclagem nos sedimentos, além de outros fatores ambientais, como luz e temperatura. Os sedimentos constituem uma importante fonte de nutrientes para a coluna da água, pois a matéria orgânica aí depositada é remineralizada por processo de oxidação liberando elementos essenciais para a produção pelágica (Nixon, 1995; Jorgensen, 1996; De Jonge et al., 2002; Knoppers et al., 2004). Contudo, o acoplamento entre o sedimento e a coluna da água é dependente da profundidade local, da estratificação física da

coluna da água e da capacidade do nutriente mineralizado na água de fundo atingir a zona fótica produtora pelágica. Portanto, a caracterização físico-química da coluna d' água é extremamente importante para compreender o funcionamento de tais sistemas (Abreu et al., 1992; Abreu et al., 1994; Fonseca 2004; Medina-Gomez; Herrera-Silveira, 2006; Lherter et al., 2012).

Além dos processos naturais que envolvem a produção primária, a entrada de nutrientes por fontes antropogênicas, principalmente o P e N, resulta em uma elevada taxa da produção da biomassa e, conseqüentemente, do acúmulo de matéria orgânica, tornando o sistema eutrofizado (Nixon, 1995; Rabalais et al., 2009; Rabalais et al., 2010). Aumento da turbidez, perda da biodiversidade, hipoxia/anoxia e crescimento excessivo de produtores primários, incluindo algas nocivas, são alguns dos sintomas que caracterizam a eutrofização (Gray et al., 2002; De Jonge et al., 2002; Smith et al, 2003). Segundo Bricker et al. (2007) e a Comissão de OSPAR (2003), aproximadamente 78% da zona costeira dos E.U.A e 65% da costa atlântica da Europa estão sofrendo os efeitos da eutrofização. A eutrofização é um dos principais fatores causador de efeitos deletérios na qualidade da água, na cadeia alimentar e nos ciclos biogeoquímicos das regiões costeiras, trazendo efeitos substanciais na economia global (Cloern, 2001; Da Silva et al., 2003; Rabalais, 2004). Os processos de eutrofização em sistemas costeiros estão interligados a intensidade das práticas agrícolas, atividades industriais, queima de combustíveis fósseis,

emissão direta de efluentes domésticos, entre outros (Nixon 1995; Newton, 2003; Selman; Greenhalgh, 2008).

Uma das consequências mais graves do processo da eutrofização é a hipoxia/anoxia que vem aumentando exponencialmente nas últimas décadas. A estratificação da coluna d'água e a elevada carga de matéria orgânica são os principais fatores para o desenvolvimento da hipoxia (Rabalais et al., 1991; Diaz, 2001; Strama et al., 2008). A matéria orgânica particulada, produzida pelas elevadas taxas de produção primária (PP) e não consumida, tende a sedimentar e acumular nas águas de fundo quando a homogeneização da coluna da água não é eficiente. A decomposição desta matéria sedimentada ocorre pelos processos de oxidação e respiração, consumindo o oxigênio presente na água. Se o consumo deste gás for maior do que a sua entrada por processos físicos de mistura ou biológico de PP, a água de fundo estagnada tende a formar a anoxia (Rabalais, 1994; Stow et al., 2005; Eldridge; Roelke, 2010). Quando o nível do oxigênio dissolvido (OD) diminui para 2 mg L^{-1} a vida marinha e os ecossistemas sofrem impactos acentuados e se agravam quando atingem as condições anóxicas ("zonas mortas"). Sob esta baixa concentração de OD, os organismos aeróbios, como os peixes, crustáceos e organismos bentônicos não sobrevivem, resultando em perda da biodiversidade do ecossistema (Rabalais; Turner, 2001; Diaz, 2001; Vaquer-Sunyer; Duarte, 2008). Estudos de caso realizados em áreas impactadas por hipoxia, tais como, o Mar Adriático, Mar Negro, estuários Dinamarqueses e a Baía de

Delaware (EUA) mostraram que mesmo depois de aumentos significativos nos níveis de OD nas águas de fundo, os ecossistemas bentônicos não estavam recuperados e levariam décadas para atingir maior biodiversidade (Steckbauer et al., 2011).

Mudanças climáticas globais irão intensificar os fatores que causam hipoxia, tanto a natural, que ocorre em ressurgências oceânicas, quanto a de origem humana, pois o aumento da temperatura da superfície da água será suficiente para aumentar a estratificação da coluna da água e diminuir a ventilação da água de fundo (Rabalais et al., 2010). Recentemente, Melzner et al. (2013), identificou que áreas hipóxicas podem levar a um maior aumento na concentração de carbono inorgânico dissolvido total e da pressão parcial de CO_2 (pCO_2), o que poderá amplificar a acidificação dos oceanos. Por outro lado, o aumento na concentração de CO_2 em sistemas costeiros rasos, onde a luz alcança estas zonas hipóxicas, pode favorecer um grupo especializado de bactérias que são capazes de fixar este gás, denominadas bactérias anaeróbicas anoxigênicas fototróficas - AnAnP (Overman; Garcia-Pichel, 2006; Fontes; Abreu, 2011).

A Lagoa da Conceição (Florianópolis, SC), no sul do Brasil, é uma das áreas que apresenta hipoxia sazonal devido à estratificação da coluna da água e da elevada taxa da produção primária (Odebrecht & Caruso, 1987; Sierra de Ledo & Soriano-Sierra, 1994; Fonseca, 2004; Fontes 2004; Fonseca & Braga; 2006). A partir da abertura permanente do canal da Barra da

Lagoa em 1982, que liga a Lagoa da Conceição (LC) ao mar aberto, a estratificação física da coluna d'água da região Central da LC formou-se e a presença de anoxia na água de fundo foi descrita primeiramente por Odebrecht & Caruso (1987). No entanto, quando a LC não estava interligada diretamente ao mar adjacente, a haloclina não havia sido desenvolvida (Assumpção et al, 1981). Eventos sazonais de hipoxia/anoxia têm sido observados na região central durante o outono-inverno, devido à degradação da matéria orgânica produzida no período de verão e a diminuição da incidência da luz na coluna d' água (Fonseca 2004; Fontes 2004; Fonseca & Braga, 2006; Fontes & Abreu, 2009; Fontes et al, 2011). Elevados picos de biomassa fitoplanctônica ($1,604$ e $32,5 \mu\text{g L}^{-1}$) foram observados nestas águas de fundo em condições anóxicas, sugerindo que as bactérias autotróficas e cianobactérias sejam as principais componentes da biomassa autotrófica nesta região (Odebrecht & Caruso, 1987; Fontes 2004). Fontes et al. (2011), observaram na LC que os níveis do bacterioplâncton (Bchl-a) triplicaram do verão para o outono na água de fundo da região central e relacionaram esta variação com a diminuição da incidência da luz na coluna d'água e com as condições hipóxicas/anóxicas encontradas na região. Estes mesmos autores reportaram que no período de verão, a fixação do carbono (C) ($100 \text{ mgC.m}^{-3}.\text{h}^{-1}$) na água de fundo da LC está associada com a produção de oxigênio e elevada biomassa fitoplanctônica. Por outro lado, no outono, com a diminuição da luminosidade, estes autores verificaram que a fixação de C ($223 \text{ mgC.m}^{-3}.\text{h}^{-1}$) se dissocia da

produção de oxigênio e correlaciona-se com o aumento da biomassa das bactérias anaeróbicas anoxigênicas fotoautotróficas (AnAnP) demonstrando a importância destes organismos como produtores primários na LC.

Estudos sobre a fixação do CO_2 pelas comunidades planctônicas marinhas em águas rasas são fundamentais frente às mudanças globais e a importância do oceano para o ciclo biogeoquímico do C (Arrigo et al., 2007; Ribas-Ribas et al., 2013). A dinâmica climática que ocorre no planeta terra está relacionada com causas naturais e antropogênicas, onde, o aumento da temperatura média global é uma grave consequência da maior incidência da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera, principalmente o dióxido de carbono (CO_2). Essa taxa de aumento é impulsionada pela queima de combustíveis fósseis, desmatamento das florestas e emissão de aerossóis (Keeling et al., 2005; Libes, 2009). Os oceanos são considerados como os maiores sorvedouros de C da atmosfera, absorvendo-o rapidamente da atmosfera e retendo-o por mais tempo via processos biogeoquímicos.

A sazonalidade na produção primária marinha deve ser considerada aos estudos de fluxos de CO_2 na interface ar-água e a dinâmica autotrófica e heterotrófica do sistema. No período onde existe uma maior incidência da luz solar (verão), a taxa de assimilação do carbono pelos produtores primários é mais elevada (autotrofia líquida), assim ocorre uma maior produção de matéria orgânica e um maior consumo de carbono inorgânico dissolvido (CID ou $\text{CO}_{2\text{total}}$). Por outro lado, quando a incidência

da luz diminui (inverno), os processos de mineralização predominam (heterotrofia líquida), ocorrendo maior liberação de CO_2 pela respiração devido ao consumo de O_2 para a degradação da matéria orgânica (Thomas et al., 2004; Libes, 2009). A produção primária líquida (PPL) nos processos fotossintéticos representa uma importante fonte de carbono orgânico particulado (COP) e dissolvido (COD) para a cadeia alimentar, além de consumir o CID presente na água. Além da produção primária, dos exsudatos e da decomposição da matéria orgânica alóctone e autóctone, as principais fontes de carbono orgânico (COD e COP) para os ecossistemas costeiros são as descargas fluviais e antropogênicas. Processos de dessorção também podem contribuir para a liberação de COD e POC para a coluna d'água, pois são fracamente ligados aos minerais presentes nos sedimentos (Bianchi, 2007). No entanto, existem poucas informações sobre a fixação e dinâmica do carbono em sistemas costeiros estratificados, principalmente em lagunas sob condições de oxirredução.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Avaliar a dinâmica dos nutrientes e o estoque de C (CID, COD e COP) nas diferentes condições metabólicas da água de superfície, topo da haloclina e de fundo da região Central da Lagoa da Conceição (SC), quantificando a fixação do carbono.

1.1.2 Específicos

1. Caracterizar a estrutura física da coluna d' água relacionando com a dinâmica de nutrientes na região;
2. Quantificar o estoque de carbono orgânico total (COT), orgânico dissolvido (COD) e inorgânico dissolvido (CID) nas diferentes massas de água da região central da Lagoa da Conceição (SC);
3. Avaliar a distribuição espaço-temporal da fixação de carbono nas diferentes condições de oxirredução da coluna d' água lagunar;
4. Estimar o fluxo do CO_2 na interface atmosfera-água e relacionar com as condições metabólicas do sistema.

2 CAPÍTULO 1 - DISTRIBUIÇÃO DOS NUTRIENTES INORGÂNICOS EM UMA LAGUNA RASA SUBTROPICAL NO SUL DO BRASIL COM EVENTOS SAZONAIS DE HIPOXIA

RESUMO

A Lagoa da Conceição é um sistema semi-fechado que vem desenvolvendo condição hipóxica/anóxica em uma região de elevada estratificação física da coluna da água, a qual é caracterizada como sítio de depósito e mineralização da matéria orgânica. Este estudo buscou acompanhar a dinâmica da coluna da água em relação às variáveis físicas e químicas para compreender o processo de eutrofização e os eventos de hipoxia e/ou anoxia na região central da Lagoa da Conceição (CCL). As águas de superfície, haloclina e fundo foram avaliadas em três pontos amostrais ao longo da CCL. O verão, outono e inverno de 2014 foram amostrados em triplicada, totalizando 09 amostras. Eventos de hipoxia ($OD < 2\text{mg.L}^{-1}$) e/ou anoxia foram observados somente durante o verão. Valores positivos da utilização aparente do oxigênio (AOU) evidenciaram os processos de mineralização do sistema nas águas de haloclina e fundo. Em agosto (inverno) foi registrado o menor índice de estratificação vertical (2 Kg.m^{-3}), o que pode estar associado à velocidade e direção dos ventos. A variação temporal dos nutrientes apontou para uma maior concentração no inverno, evidenciando a remineralização da matéria orgânica no sistema.

Palavras-chave: Eutrofização. Estratificação. Anoxia. Nutrientes. Mineralização.

2.1 INTRODUÇÃO

Lagunas são ambientes dinâmicos e complexos, os quais estão separados do mar adjacente por barreiras de sedimentos, com pontos limitados de troca de água, ocasionando fortes gradientes temporais de propriedades físicas, químicas e biológicas (Nogueira et al., 1997; Newton et al., 2003). A matéria alóctone introduzida naturalmente ou por forças antropogênicas nestes sistemas é eficientemente retida, devido ao maior tempo de residência da água, redução das fontes de energias (marés, correntes e ondas) e o acoplamento entre sedimento e a coluna d' água, intensificando o processo de eutrofização (Cloern 2001; Grey, et al., 2002; Kennish; Paerl, 2010).

Segundo Diaz; Rosenberg (2008) e Gilbert et al. (2010), a eutrofização antropogênica está contribuindo para a expansão de ocorrência, duração e intensidade de hipoxia em águas costeiras mundiais. A estratificação da coluna d' água e a elevada carga de matéria orgânica são os principais fatores para o desenvolvimento da hipoxia (Rabalais et al., 1991; Diaz, 2001; Strama et al., 2008). Concentrações de oxigênio dissolvido abaixo de 2 mg.L^{-1} caracterizam águas hipóxicas e podem alterar o comportamento, reduzir o crescimento e aumentar a mortalidade de inúmeras espécies marinhas, bem como, modificar ou interromper processos biogeoquímicos, como a ciclagem de nutrientes (Díaz, 2001; Rabalais; Turner, 2001; Rabalais, 2004; Steckbauer et al., 2011; Liu et al., 2012).

Pelo menos 415 sistemas costeiros mundiais possuem registros que indicam que estão em processo de eutrofização, destes 169 têm apresentado formação de áreas hipóxicas (Selman et al., 2008). No Brasil, os sistemas costeiros sob o processo de eutrofização e que apresentam eventos hipóxicos ainda são pouco reportados na literatura, limitando-se a Baía de Guanabara (RJ), Baía Pina (PE), Lagoa de Imboassica (RJ), Lagoa Rodrigo de Freitas (RJ), Lagoa de Araruama (RJ) e Lagoa da Conceição (SC), segundo revisão de Díaz; Rosenberg (2008).

O balanço hídrico de evaporação/precipitação e a intensidade e direção dos ventos são fatores importantes para a hidrodinâmica e para o transporte advectivo em sistemas lagunares. A estratificação da coluna d' água, a turbidez, o tempo de residência e a diluição dos nutrientes também são influenciados diretamente por estes fatores (Rabalais et al., 1998; Cloern, 2001; McGlathery et al., 2001; Kennish; Paerl, 2010). O aumento da temperatura atmosférica e da estratificação da coluna da água, as mudanças nos regimes dos ventos e nos ciclos hidrológicos, a expansão e o aumento na duração de zonas anóxicas são algumas das consequências que irão afetar diretamente estes sistemas, os quais são considerados extremamente suscetíveis às mudanças globais (Zanchettin et al., 2007; Lloret et al., 2008; Rabalais et al., 2010).

A Lagoa da Conceição (LC), no sul do Brasil, está em processo de eutrofização e vem apresentando eventos sazonais de hipoxia e/ou anoxia nas águas de fundo da região central (CCL), a qual está conectada ao mar adjacente (Knoppers et al.,

1984; Odebrecht; Caruso Jr., 1987; Sierra de Ledo; Soriano-Sierra, 1994; Fonseca; Braga, 2006; Fontes et al., 2006; Fontes; Abreu, 2009; Fontes et al., 2011). Estes eventos apareceram neste sistema logo após a abertura permanente do canal em 1982, quando a entrada da água oceânica estratificou a coluna d'água desta região. A hipoxia e ou anoxia tem sido registrada principalmente no outono, quando o oxigênio é utilizado para degradar a matéria orgânica autóctone e alóctone produzida durante o verão (Odebrecht; Caruso Jr., 1987; Fontes et al., 2011). Por outro lado, no verão, tem sido reportado supersaturação de OD na água de fundo da CCL associada à alta disponibilidade de nutrientes e a incidência de luz que promovem elevada produção primária e inserção de oxigênio no meio (Odebrecht; Caruso Jr., 1987; Fontes; Abreu, 2009). As variações sazonais nas concentrações dos nutrientes na laguna são conduzidas pelos processos de assimilação, predominantes no período de primavera-verão e remineralização associada ao outono e inverno (Odebrecht; Caruso Jr., 1987; Fonseca; Braga, 2006; Fontes et al., 2006; Fontes; Abreu, 2009; Fontes et al., 2011).

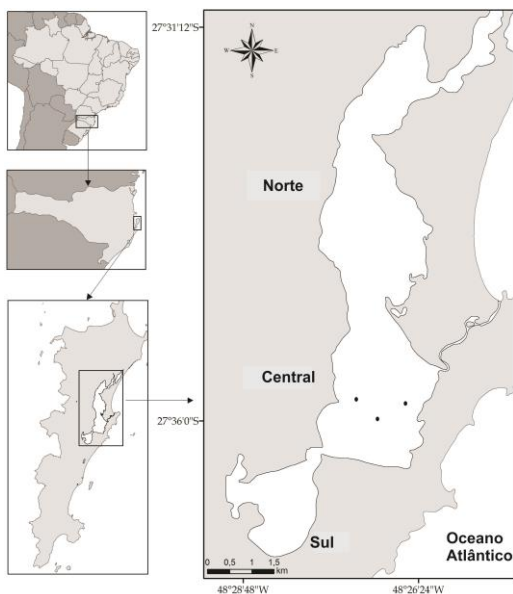
Considerando a dinâmica deste ambiente, este estudo procurou acompanhar a distribuição dos nutrientes e os processos físico-químicos que comandam a eutrofização, bem como, os eventos sazonais de hipoxia e/ou anoxia que ocorrem na região central da LC.

2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.2.1 Área de Estudo

A Lagoa da Conceição é um sistema semifechado que se interliga ao mar aberto por um canal de 2 km de extensão. A laguna abrange uma bacia hidrográfica de 80 Km², incluindo o corpo lagunar de 20 Km². A laguna se estende por 13,5 km de comprimento e larguras variando entre 0,5 e 2,5 Km e apresenta profundidade média de 1,7 e máxima de 8,7 m (Knoppers et al., 1984; Muehe; Caruso Jr., 1989) (Fig. 1).

Figura 1 - Localização das estações amostrais na região central da Lagoa da Conceição (SC), Brasil.



Fonte: Modificado de Abreu, 2009.

O ciclo de evaporação/precipitação e o regime de ventos são os fatores determinantes na circulação e renovação das águas do sistema lagunar. Os ventos predominantes na região são os do quadrante norte, porém os de maior intensidade são os de quadrante sul, que predominam no período de inverno (Odebrecht; Caruso Jr., 1987). O efeito da maré meteorológica predomina na laguna em comparação ao da maré astronômica, sendo que 98% desta forçante é dissipada ao longo do canal antes de entrar no sistema (Godoy, 2009). A precipitação mensal varia em média de 74,1 a 172,4 mm e as maiores ocorrências de chuvas são observadas nos períodos de verão e primavera (Cruz, 1998). As principais entradas de água doce no sistema são provenientes da precipitação, riachos e água subterrânea (Sierra De Ledo; Soriano-Serra, 1994, Fonseca, 2004). O principal tributário é o rio João Gualberto Soares que deságua na porção norte da laguna.

Estudos pretéritos na LC distinguiram a laguna em três subsistemas de acordo com as características físico-químicas da água, as regiões Sul, Central e Norte (Assumpção et al., 1981; Knoppers et al., 1984; Odebrecht; Caruso Jr., 1987; Souza-Sierra et al., 1987; Muehe; Caruso Jr., 1989; Fonseca; Braga, 2002). A região Central apresenta a coluna da água com estratificação salina, de características meso à polihalina e com eventos de anoxia nas águas de fundo devido a sua estagnação e ao acúmulo de matéria orgânica (Knoppers et al., 1984; Souza-Sierra et al., 1987; Odebrecht; Caruso Jr. 1987; Fonseca et al.,

2002). A emissão direta de efluentes domésticos é um dos principais fatores de entrada de nutrientes para este sistema (Fonseca, 2006).

2.2.2 Atividade em Campo

A água da CCL foi amostrada em triplicata no período de verão (21/01/2014, 05/02/2014 e 25/02/2014), outono (08/05/2014, 15/05/2014 e 27/05/2014) e inverno (10/07/2014, 30/07/2014, 14/08/2014) de 2014. Em cada ponto amostral, um perfil da coluna da água com medidas *in situ* a cada 0,5 m foi feito para estimar a temperatura (°C), salinidade (PSU), concentração de oxigênio dissolvido (OD, mg.L⁻¹ e % de saturação) e a radiação fotossinteticamente ativa (PAR $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), utilizando-se de um termosalinômetro (mod. EC 300 YSI), oxímetro (YSI, mod. 55) e radiômetro (LI Cor mod. 2501 Biosciences), respectivamente. As águas de subsuperfície (0,5m), haloclina (definida a partir do perfil de salinidade) e fundo (0,5 m acima do fundo) foram amostradas com garrafa de Van Dorn, provida de fechamento horizontal, para análise da concentração de nutrientes e pigmentos fitoplanctônicos. A amostra de água foi transferida para frasco de polietileno de 500 ml (pré-lavados com HCl a 10%) e resfriada em caixa térmica ao abrigo da luz até o laboratório.

Em laboratório, as amostras foram filtradas em filtros Macherey Nagel GF/F (0,7 μm de porosidade) e congeladas a -20°C até serem analisadas. Os filtros foram imediatamente

congelados para análise dos pigmentos fotossintéticos. As concentrações de nitrato (NO_{3+2}^-), amônio (NH_4^+), fosfato (PO_4^{3-}) e silicato (SiO_2) foram determinadas por técnica colorimétrica (Grasshoff et al., 1983), em espectrofotômetro (mod. Hitachi U-2900, com sistema sipper).

Os pigmentos fotossintetizantes (clorofila-a (Chl-a) e feofitina (Feo) retidos nos filtros foram extraídos com acetona a 90% (v/v) durante um período de 24 horas sob refrigeração de 4°C e no escuro. As concentrações dos pigmentos foram determinadas pelo método de Lorenzen em espectrofotômetro (mod. Bioespectro SP-120) utilizando-se cubeta de 5 cm de passo óptico, seguindo as recomendações descritas em Strickland; Parsons (1972).

Os dados meteorológicos, precipitação diária (mm) e média diária da intensidade (m.s^{-1}) e direção (graus decimais) dos ventos, foram adquiridos pela estação da EPAGRI-CIRAM localizada próxima a LC. Considerou-se os dados dos cinco dias que antecederam as amostragens como determinantes para relacionar às condições da coluna da água observadas em campo.

2.2.3 Análise dos Dados

O índice de estratificação da coluna da água foi calculado pela diferença entre a densidade da água da superfície e do fundo, definida a partir da salinidade e temperatura medidas *in situ*. A utilização aparente do oxigênio (AUO) em porcentagem de

saturação (%) foi calculada de acordo com Benson; Krause (1984).

A análise de variância permutacional uni ou multivariada (PERMANOVA) foi utilizada para testar as diferenças significativas espaciais (entre profundidade) e temporais (entre períodos de coleta) das variáveis OD, PAR, salinidade, temperatura, nutrientes e pigmento fitoplanctônico. Concomitante, a análise de escalonamento multidimensional (MDS), com base na distância Euclidiana, foi utilizada gerando uma representação gráfica de similaridade (ou distância) das variáveis abióticas e bióticas entre as escalas temporais e espaciais. O *stress* = 0,1 é considerado satisfatório para a representação dos dados no plano (Clarke e Warnick, 1994). A correlação simples de Pearson foi feita pelo Programa do R Console (3.0.3), considerando $p < 0,05$. A PERMANOVA e o MDS foram gerados no programa PRIMER (Plymouth Routine in Multivariate Ecological Research-Plymouth University).

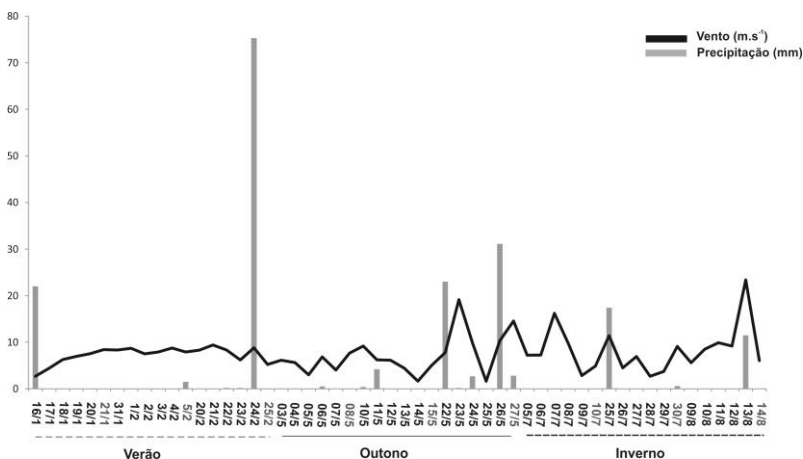
2.3 RESULTADOS

2.3.1 Climatologia

No verão, os ventos foram de $7,3 \pm 1,7 \text{ m.s}^{-1}$ e a precipitação máxima de 75 mm ocorreu em 24/02, um dia antes da amostragem. O inverno foi marcado por ventos intensos ($8,2 \pm 4,8 \text{ m.s}^{-1}$) do quadrante sul e os menores valores de precipitação ($1,64 \pm 4,63 \text{ mm}$). No dia que precedeu a amostragem de 14/08

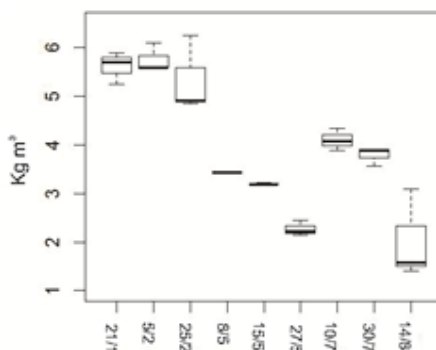
ventos de maior intensidade ($23,3 \text{ m.s}^{-1}$) foram observados (Fig. 2). O outono apresentou-se como transição entre estes períodos, com ventos de $7,1 \pm 4,2 \text{ m.s}^{-1}$ e precipitação de $3,6 \pm 8,5 \text{ mm}$ (Fig. 2).

Figura 2 - Valores médios diário da velocidade dos ventos (m.s^{-1}) e da precipitação (mm) nos cinco dias precedentes a amostragem (preto) e durante o dia de coleta (cinza) na região central da LC (SC) no período de verão, outono e inverno de 2014.



temperaturas mais elevadas ocorrendo no período de verão e as mais baixas no inverno (tabela 1), com exceção da água de fundo em 25/02, onde foi observada a temperatura mínima do estudo (16,1°C). O índice de estratificação vertical variou de 3,43 Kg m³ (outono) a 6,24 Kg m³ (verão). Em agosto (inverno) foi registrado o menor índice para o estudo (2 Kg m³), evidenciando uma possível quebra de estratificação da coluna d' água associada à velocidade e direção dos ventos presentes neste período (Fig. 3). A PAR incidente na água de superfície no verão (1347 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) foi o dobro da radiação solar incidente no outono (681 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e 13 x maior do que no inverno (104 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (Fig. 4). A zona eufótica atingiu o fundo praticamente em todo o estudo, com exceção do dia 05/2 e na estação 3, no dia 25/2, a qual é mais próxima as descargas dos efluentes domésticos (tabela1).

Figura 3 - Mediana, quartis, mínimo e máximo do Índice de estratificação (Kg m³) no verão (21/1, 05/2, 25/2), outono (08/5, 15/5, 27/5) e inverno (10/7, 30/7, 14/8) de 2014 na região central da LC (SC).



Fonte: Autor, 2014.

Tabela 1 - Média (\pm DS) da temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidade (psu) e da PAR (%) nas águas de superfície, haloclina e fundo da região central da LC (SC) nos períodos de verão (21/01, 05/02, 25/02), outono (08/5, 15/8, 27/5) e inverno (10/7, 30/7, 14/8) de 2014.

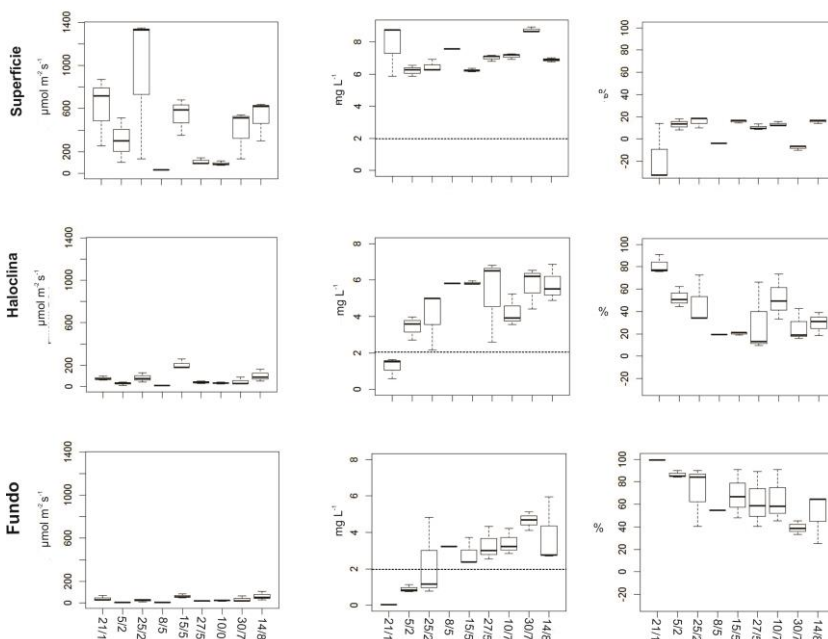
Data	Prof (m)	T	Salinidade	PAR
21/1	0,5	$29 \pm 0,5$	$24,5 \pm 0,25$	19 ± 7
	3	$27,4 \pm 0,1$	30 ± 0	$2,4 \pm 0,2$
	4	$26,3 \pm 0,4$	$30,7 \pm 0,2$	$1,25 \pm 0,45$
05/2	0,5	$25 \pm 0,2$	$25,8 \pm 0,2$	$11,5 \pm 4,7$
	3,5	$23,7 \pm 0,2$	$28 \pm 0,2$	$1,1 \pm 0,4$
	4,5	$20 \pm 0,2$	$31,7 \pm 0,16$	$0,2 \pm 0,06$
25/2	0,5	$21 \pm 0,05$	$26 \pm 0,1$	29 ± 18
	3,5	$20 \pm 1,2$	$28 \pm 0,5$	$2,5 \pm 1,3$
	4	$16 \pm 1,6$	$32 \pm 0,2$	$0,7 \pm 0,35$
08/5	0,5	23 ± 0	27 ± 0	18 ± 0
	3	$23,3 \pm 0$	$31 \pm 0,2$	$5,8 \pm 0$
	4	$23,4 \pm 0$	32 ± 0	$1,2 \pm 0$
15/5	0,5	$21,7 \pm 0,25$	$27,2 \pm 0,1$	$28,4 \pm 9$
	2,5	$22 \pm 0,1$	$29,2 \pm 0,2$	$10,6 \pm 2,3$
	4	$23 \pm 0,15$	$32 \pm 0,1$	$3,2 \pm 1,1$
27/5	0,5	$18,8 \pm 0,05$	$28,2 \pm 0,2$	$16,5 \pm 1,1$
	4	$20 \pm 0,65$	$30 \pm 0,1$	$5,6 \pm 0,75$
	5	$21,5 \pm 0,2$	$32,2 \pm 0,15$	$2,6 \pm 2,5$
10/7	0,5	$18 \pm 0,1$	$24,4 \pm 0,1$	$20,5 \pm 3,4$
	3	$19 \pm 0,45$	$28,4 \pm 0,8$	$7 \pm 0,8$
	4	$19,5 \pm 0,45$	$30,3 \pm 0,25$	$4,7 \pm 0,8$
30/7	0,5	$17,5 \pm 0,1$	$25,5 \pm 0,15$	$28 \pm 1,1$
	3	$19 \pm 0,1$	$31 \pm 0,4$	4 ± 2
	4	$19,5 \pm 0,25$	$31 \pm 0,1$	$2,5 \pm 1$
14/8	0,5	$17 \pm 0,3$	$27 \pm 0,2$	$36,7 \pm 10$

3,5	$17 \pm 0,6$	$28,3 \pm 0,3$	$6,7 \pm 1,7$
4,5	$18 \pm 0,9$	$30 \pm 0,6$	$4 \pm 0,1$

Fonte: Autor, 2014.

Águas com hipóxia ($< 2 \text{ mg L}^{-1}$) e anoxia foram observadas somente no período de verão, quando a concentração de OD variou de anóxico (águas de haloclina e fundo) a $8,7 \text{ mg L}^{-1}$ (águas de superfície) (Fig. 4). No outono a variação foi de $2,3 \text{ mg L}^{-1}$ (águas de fundo) a $7,5 \text{ mg L}^{-1}$ (águas de superfície) (Fig. 4) e no inverno foi de $2,8 \text{ mg L}^{-1}$ (águas de fundo) a 9 mg L^{-1} (águas de superfície), período em que ocorreram as maiores concentrações de OD. Observou-se uma correlação significativa e inversa entre OD de fundo e o índice de estratificação da coluna da água ($r = -0,42$ $p < 0,05$) em todo o estudo. De um modo geral, os valores de AOU indicaram aumento do consumo de OD (ou mineralização líquida) das águas superficiais para as águas de fundo da laguna. Nas águas de superfície a variação foi entre -32,2 % (supersaturação de OD) a 18,4% (instauração do gás) (Fig.4). As águas de haloclina e de fundo sempre estiveram insaturadas para o OD, com valores de AOU de 9,4% a 90,9% e de 25,2% a 99,7%, respectivamente (Fig. 4).

Figura 4 - Mediana, quartis, mínimo e máximo da concentração da Radiação Fotossintética Ativa ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), oxigênio dissolvido OD (mg.L^{-1}) e Utilização aparente do oxigênio (%) nas águas de superfície, haloclina e fundo da região central da LC (SC) no verão (21/1, 05/2, 25/2) outono (08/5, 15/5, 27/5) e inverno (10/7, 30/7, 14/8) de 2014.



Fonte: Autor, 2014.

2.3.3 Nutrientes Inorgânicos Dissolvidos e Pigmentos Fotossintéticos

A concentração média do NID ($\text{NO}_{3+2}^- + \text{NH}_4^+$) e PID (PO_4^{3-}) durante o período de verão foi de $1,96 \pm 0,87 \mu\text{M}$ e $0,1 \pm 0,04 \mu\text{M}$, respectivamente. A razão N/P observada foi de $21,8 \pm 10,4$

(tabela 2) e a porcentagem relativa do amônio (NH_4^+) no total do DIN foi de 68%. No outono, os valores observados para o NID e PID foram de $2,85 \pm 2,5 \mu\text{M}$ e $0,1 \pm 0,05 \mu\text{M}$. O amônio representou 69% do total do NID e a média da razão N/P foi de $42,7 \pm 39,3$ (tabela 2). Já no período de inverno, foram observados os maiores valores do estudo, onde as concentrações médias do NID e PID foram de $6,6 \pm 4,5 \mu\text{M}$ e $0,2 \pm 0,07 \mu\text{M}$, respectivamente. A razão N/P foi de $41,7 \pm 32,2$ e com 97% do NH_4^+ representando o total do NID (tabela 2). Em relação ao silicato, as concentrações foram baixas neste estudo, variando entre $0,01 \mu\text{M}$ (água de superfície no outono) a $20,6 \mu\text{M}$ (água de fundo no inverno) (tabela 2).

A concentração média da Chl-a no período de verão foi de $8,4 \pm 5,4 \mu\text{g L}^{-1}$, sendo de $6,2 \pm 2,3 \mu\text{g L}^{-1}$ no outono e de $5,6 \pm 4,7 \mu\text{g L}^{-1}$ no inverno. Máximos deste pigmento foram registrados nas águas de superfície em janeiro ($25,3 \mu\text{g L}^{-1}$) e em agosto ($22,9 \mu\text{g L}^{-1}$) de 2014. No dia 10/07 foi registrado na água de superfície o menor valor do estudo ($0,8 \mu\text{g L}^{-1}$) (tabela 2). Em relação à Feo-a, os resultados observados foram próximos entre os períodos, no verão a concentração foi de $3,43 \pm 2,7 \mu\text{g L}^{-1}$, no outono de $2,9 \pm 2,8 \mu\text{g L}^{-1}$ e no inverno foi de $3,2 \pm 2,6 \mu\text{g L}^{-1}$ respectivamente (tabela 2).

Tabela 2 - Concentração média (\pm DS) de nitrato (NO_3^-), amônio (NH_4^+), fosfato (PO_4^{3-}), silicato (SiO_2), razão N/P, Cloro-a e Feo nas águas de superfície, haloclina e fundo da região central da LC (SC) nos períodos de verão (21/01, 05/02, 25/02), outono (08/05, 15/08, 27/05) e inverno (10/07, 30/07, 14/08) de 2014.

Data	Prof (m)	NO_3^- (μM)	NH_4^+ (μM)	PO_4^{3-} (μM)	SiO_2 (μM)	N/P	Chl-a ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	Feo ($\mu\text{g.L}^{-1}$)
21/1	0,5	$0,5 \pm 0,04$	$1,5 \pm 0,7$	$0,1 \pm 0,06$	$4,1 \pm 2,2$	21 ± 10	$15,4 \pm 8,4$	$3,6 \pm 4$
	3	$0,5 \pm 0,02$	$0,85 \pm 0,02$	$0,1 \pm 0,01$	2 ± 1	14 ± 2	$12 \pm 4,1$	$3,2 \pm 2,6$
	4	$0,5 \pm 0,04$	$1,2 \pm 0,5$	$0,14 \pm 0,05$	$3 \pm 0,7$	16 ± 10	$11,3 \pm 4,4$	$4,3 \pm 2,2$
05/2	0,5	$0,6 \pm 0,04$	$0,9 \pm 0,3$	$0,1 \pm 0,01$	$0,45 \pm 0,2$	17 ± 4	$6,2 \pm 4,6$	$2,5 \pm 2,3$
	3,5	$0,7 \pm 0,04$	$1,3 \pm 0,1$	$0,08 \pm 0,02$	$1 \pm 0,24$	26 ± 12	$8,1 \pm 3,9$	$4,4 \pm 3,3$
	4,5	$0,6 \pm 0,1$	$1,4 \pm 0,6$	$0,1 \pm 0,03$	$2,1 \pm 1,4$	23 ± 3	$5,3 \pm 2,3$	$2 \pm 1,8$
25/2	0,5	$0,5 \pm 0,12$	$1,2 \pm 0,45$	$0,1 \pm 0,01$	$2,8 \pm 1,9$	32 ± 13	$3,6 \pm 0,8$	$2 \pm 1,5$
	3,5	$0,5 \pm 0,2$	$1,8 \pm 1,2$	$0,13 \pm 0,02$	$2,65 \pm 2,2$	17 ± 8	$7,7 \pm 2,5$	$3,3 \pm 1,2$
	4	$0,4 \pm 0,07$	$2,7 \pm 0,7$	$0,1 \pm 0$	$0,8 \pm 0,5$	30 ± 7	$7 \pm 2,8$	$5,5 \pm 1,1$
08/5	0,5	$0,55 \pm 0$	$0,6 \pm 0$	$0,01 \pm 0$	$0,01 \pm 0$	140 ± 0	$4,3 \pm 0$	$1,15 \pm 0$
	3	$0,54 \pm 0$	$1,3 \pm 0$	$0,1 \pm 0$	$0,1 \pm 0$	17 ± 0	8 ± 0	$3,5 \pm 0$
	4	$0,7 \pm 0$	$5,8 \pm 0$	$0,13 \pm 0$	$0,13 \pm 0$	50 ± 0	$11,5 \pm 0$	$6,45 \pm 0$
15/05	0,5	$0,7 \pm 0,14$	$0,6 \pm 0,23$	$0,1 \pm 0,01$	$0,7 \pm 0,6$	15 ± 4	$3 \pm 0,6$	$1 \pm 0,3$
	2,5	$0,55 \pm 0,1$	$0,45 \pm 0,1$	$0,1 \pm 0,01$	$2,5 \pm 1,7$	31 ± 29	$5,15 \pm 2$	$2,2 \pm 0,3$
	4	$0,6 \pm 0,1$	$7 \pm 2,13$	$0,2 \pm 0,03$	$1,55 \pm 1,3$	46 ± 9	$6,6 \pm 0,4$	$6,4 \pm 5,6$
27/5	0,5	$0,4 \pm 0,1$	$1,13 \pm 0,2$	$0,05 \pm 0,02$	$0,8 \pm 0,6$	40 ± 24	$7,1 \pm 3,4$	$1,9 \pm 1,5$
	4	$0,4 \pm 0,07$	$2 \pm 1,6$	$0,1 \pm 0,02$	$0,9 \pm 0,6$	27 ± 23	$5,8 \pm 2,3$	$1,8 \pm 0,4$
	5	$0,5 \pm 0,1$	$2,3 \pm 1,5$	$0,13 \pm 0,01$	$1,1 \pm 0,7$	20 ± 9	$5,2 \pm 1,7$	$1,8 \pm 0,5$

10/7	0,5	2,4 ± 0,4	6,7 ± 1,8	0,13 ± 0,02	3,5 ± 2,5	72 ± 25	1,95 ± 1	2 ± 0,6
	3	1,1 ± 0,5	11,2 ± 5,7	0,2 ± 0,02	4,3 ± 0,9	80 ± 45	2,5 ± 0,5	2,2 ± 0,3
	4	1 ± 0,7	9,3 ± 1,8	0,2 ± 0,04	17,5 ± 2,6	61 ± 12	2,5 ± 0,9	1,5 ± 0,3
30/7	0,5	1 ± 0,2	3,7 ± 2,45	0,2 ± 0,02	1,2 ± 0,3	49 ± 25	6,3 ± 2,8	2,8 ± 1
	3	0,9 ± 0,1	4,3 ± 4	0,2 ± 0,03	2,85 ± 1,7	23 ± 16	8 ± 2,6	3,6 ± 1,8
	4	0,9 ± 0,2	7,3 ± 2,4	0,2 ± 0,01	3,7 ± 2,2	45 ± 12	8,7 ± 5,8	2,9 ± 1,3
14/8	0,5	0,9 ± 0,1	1,64 ± 1,1	0,25 ± 0,03	0,6 ± 0,2	8 ± 2	10,8 ± 8,6	6,8 ± 5,5
	3,5	0,85 ± 15	4 ± 3,1	0,3 ± 0,02	2,9 ± 3,3	22 ± 16	4,3 ± 1,1	2,3 ± 0,5
	4,5	1 ± 0,25	0,95 ± 0,7	0,45 ± 0,1	2,2 ± 0,7	16 ± 13	5,9 ± 1,4	4,5 ± ,75

Fonte: Autor, 2014.

2.3.4 Análises Estatísticas

O MDS evidenciou diferença espacial (profundidade) no eixo inferior-superior do gráfico e temporal (períodos) no eixo esquerda-direita (Fig. 5). As águas de superfície estiveram relacionadas com a concentração de OD e o PAR, enquanto que as águas de fundo associaram-se com a salinidade, concentração de PID e de Feof-*a*. As diferenças entre os períodos foram ocasionadas pelas variáveis abióticas (temperatura e PAR) e bióticas (Chl-*a*) no verão. O amônio, nitrato e fosfato foram as variáveis que melhor descreveram a diferença do inverno em relação aos demais períodos (Fig. 6). Os resultados da análise PERMANOVA mostraram que houve diferença significativa espacial (entre profundidades) e temporal

(entre períodos) para as variáveis OD, PAR, salinidade, temperatura, nutrientes e pigmentos fitoplanctônicos (tabela 3).

Tabela 3 - Resultados da análise permutacional multivariada (PERMANOVA) das variáveis físico-químicas (T°, salinidade, PAR, OD, Chl-a e Feo) entre as diferenças de períodos (verão (ver), outono (out) inverno (inv)) e profundidades (superfície (s), haloclina (h) e fundo (z)) na região central da LC (SC) em 2014.

Tratamento	dF	SS	Ms	Pseudo-F	P (perm)
período	2	164,08	84,04	12,33	0,001
prof	2	188,76	94,38	14,19	0,001
período x prof	4	46,54	11,63	1,74	0,001
residual	72	478,94	6,65		
total	80	880			

<i>Pair - Wise Tests (período x profundidade)</i>						
	superfície		haloclina		fundo	
Período	t	P(perm)	t	P(perm)	t	P(perm)
ver-out	1,4	0,8	1,9	0,002	1,6	0,024
ver-inv	2,5	0,001	2,8	0,001	2,5	0,001
out-inv	2,4	0,001	2,5	0,001	2,3	0,001

<i>Pair - Wise Tests (profundidade x período)</i>						
	verão		outono		inverno	
Profundidade	t	P(perm)	t	P(perm)	t	P(perm)
s x h	2,4	0,001	2,3	0,002	2,1	0,002
s x z	3,4	0,001	3,7	0,001	2,5	0,001
h x z	1,5	0,05	2,5	0,003	1,1	0,3

Fonte: Autor, 2014.

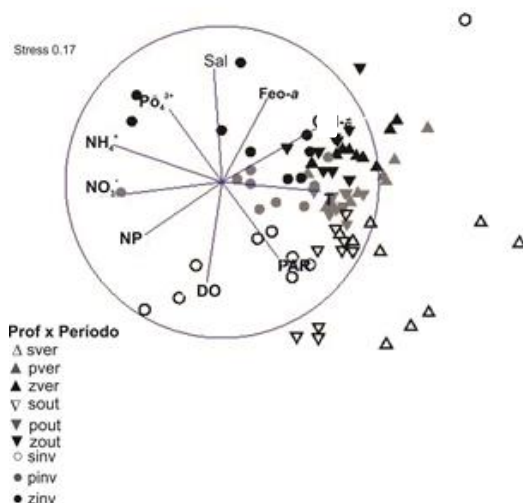
Ao considerar apenas as concentrações de nutrientes, não se observou diferenças entre as massas de água nas amostragens de verão e de inverno, enquanto que no período de outono diferenças significativas foram encontradas. Por outro lado, em escala temporal foram observadas diferenças significativas entre todos os períodos (tabela 4).

Tabela 4 - Resultados da análise permutacional multivariada (PERMANOVA) dos nutrientes (NO_3^- (μM), NH_4^+ (μM), PO_4^{3-} (μM) e SiO_2 (μM)) entre as diferenças dos períodos (verão (ver), outono (out) e inverno (inv)) e profundidades (superfície (s), haloclina (h) e fundo (z)) na região central da LC (SC) em 2014.

Tratamento	dF	SS	Ms	Pseudo-F	P (perm)	
período	2	18,56	9,28	2,94	0,01	
prof	2	57,41	28,71	9,12	0,001	
período x prof	4	16,78	4,19	1,33	0,16	
residual	72	226,53	3,14			
total	80	320				
Pair -Wise Tests (período X profundidade)						
	superfície		haloclina		fundo	
Período	t	P(perm)	t	P(perm)	t	P(perm)
ver-out	1,8	0,049	0,6	0,8	3,8	0,001
ver-inv	2,3	0,008	2,3	0,007	2,0	0,03
out-inv	2,1	0,025	1,7	0,05	1,3	0,14
Pair -Wise Tests (profundidade x período)						
	verão		outono		inverno	
Profundidade	t	P(perm)	t	P(perm)	t	P(perm)
s x h	0,7	0,66	2,0	0,002	1,2	0,18
s x z	1,0	0,36	5,5	0,004	1,5	0,08
h x z	0,6	0,81	2,8	0,006	1,0	0,36

Fonte: Autor, 2014.

Figura 5 - MDS entre as variáveis físico-químicas e químicas com amostras de água de 3 profundidades: superfície (branco), haloclina (cinza) e fundo (preto) no verão (▲), outono (▼) e inverno (●) na região central da LC (SC) em 2014.



Fonte: Autor, 2014.

2.4 DISCUSSÃO

A retenção da água oceânica nas águas de fundo da laguna está relacionada às condições meteorológicas, quando as forças físicas dos ventos e marés não são suficientes para homogeneizar a coluna d' água (Knoppers et al., 1984; Odebrecht; Caruso, 1987; Souza Sierra et al., 1987). Os menores índices de estratificação foram observados nos dias 27 de maio e 14 de agosto de 2014, amostragem de outono e inverno, respectivamente, quando foram registrados os ventos de maior intensidade do quadrante sul. Contudo, a salinidade da

água de fundo manteve-se alta em comparação com a água de superfície. Em sistemas costeiros rasos, a turbulência causada pelos ventos pode desestabilizar a coluna d' água e homogeneizá-la totalmente (Knoppers et al., 1984), fato não observado diretamente no presente estudo. Em uma laguna estratificada na Austrália, cuja profundidade máxima local é de 5m e a estratificação é comandada pela salinidade, a mistura vertical da coluna d' água foi possível no inverno quando houve persistência dos ventos com velocidade média de 7,5 m/s, associados à força da maré (Gale et al., 2006). Assim, espera-se que a coluna d' água na CCL seja homogeneizada pela ação dos ventos, favorecida pelas marés meteorológicas que são marcantes no período de outono-inverno, retornando rapidamente a estabilidade. Além disto, a bacia hidrográfica da LC apresenta encostas íngremes basálticas com pequenas sub bacias hidrográficas e que favorecem o escoamento superficial com elevado fluxo das águas (Godoy, 2009). Esta condição permite que as chuvas que ocorreram no dia anterior a estas coletas escoem com alta velocidade para a LC, o que também pode favorecer a quebra da estratificação física, como indicado por Davide (com.pess.).

O balanço hídrico em ecossistemas costeiros está associado às entradas e perdas de água doce e as trocas com o sistema marinho adjacente (McGlathery et al., 2001; Kennish; Paerl, 2010). As variações de temperatura e salinidade na água da costa da Ilha de Santa Catarina são influenciadas pela circulação oceânica. No verão, a Água Tropical (AT) e a Água

Central do Atlântico Sul (ACAS) dominam a plataforma rasa de SC. Já no inverno, a intrusão da Pluma do rio da Prata (PRP) e da Água Costeira Subtropical prevalece na região, impulsionadas pela força e frequência dos ventos do quadrante sul (Piola et al., 2000; Möller et al., 2008; Piola et al., 2008). No presente estudo, foi registrada uma temperatura de 16°C e salinidade de 32 psu na água de fundo em 25/02 (verão) o que pode estar associado à intrusão da ACAS na região. No inverno, as águas de fundo mostraram uma variação de temperatura e salinidade entre 17 a 20°C e 29.6 a 31.3 psu, respectivamente, evidenciando uma correlação aos sinais que caracterizam a PRP na região ao largo da LC (Braga et al. 2008).

Picnoclinas fortes e degradação da matéria orgânica podem resultar em menor difusão do oxigênio dissolvido, causando uma depleção deste gás nas águas de fundo e levando a formação de hipoxia e/ou anoxia em ecossistemas marinhos (Días, 2001; Rabalais et al., 2009). No presente estudo, condições hipóxicas/anóxicas foram encontradas na água de fundo durante o período de verão, esta condição se expandiu para as água de haloclina (registrada em janeiro de 2014), quando foram registradas as maiores temperaturas atmosféricas, os maiores índices de estratificação e os menores valores de luz incidente nas águas mais profundas da LC. Correlação negativa foi observada entre índice de estratificação e OD na água de fundo durante os períodos deste estudo. Fontes; Abreu (2009) encontraram esta relação negativa em julho de 2005 com águas hipóxicas, enquanto esta foi positiva em janeiro de 2006, devido

à presença de águas superóxicas nas águas de fundo. Odebrecht (1988) também encontrou supersaturação de OD na água de fundo do verão na CCL. Estes autores associaram estes valores a alta incidência da radiação solar em toda a coluna d'água, o que favoreceu a produção de oxigênio por microorganismos fotoautotróficos oxigênicos em locais estratificados. Apesar da elevada incidência de luz no verão em comparação aos outros períodos do ano, a água de fundo recebeu menos energia solar neste estudo ($2,1$ a $67 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) quando comparado ao trabalho de Fontes; Abreu (2009) que foi de 244 a $374 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). A LC drena área densamente urbanizada cujo sistema de coleta e tratamento de esgoto é incipiente, a entrada de esgoto *in natura* pode favorecer maior turbidez da água, principalmente quando o tempo de residência da água é maior devido às menores pluviosidades. Além disto, o maior tributário da LC foi dragado na semana da amostragem de 21/01, carreando sedimento para o sistema, o que possivelmente impediu que a zona fótica atingisse as águas de fundo propiciando as condições de anoxia observadas neste período.

A oxidação aeróbica da matéria orgânica foi mais significativa nas águas de haloclina e de fundo do que a síntese de OD pela produção primária (PP) ou a sua entrada via processos físicos (como a turbulência), caracterizando um sistema heterotrófico quanto ao AOU. A entrada de matéria orgânica alóctone, proveniente de efluentes domésticos e da bacia de drenagem, e a biomassa autóctone gerada pela produção primária e demais níveis tróficos alimentam esta

oxidação aeróbica na LC (Fonseca 2004; Fontes; Abreu, 2009). Outros estudos encontraram uma forte correlação positiva entre CO_2 e AOU e concluíram que os processos de respiração são os principais responsáveis pelo consumo de OD na coluna d' água (Gupta et al., 2008; Araujo et al., 2013). Assim, considerando somente as águas de haloclina e de fundo, espera-se que a CCL esteja atuando como fonte de CO_2 para a atmosfera, o que é esperado para sistemas costeiros sob eutrofização (Smith; Mackenzie, 1987; Gattuso et al., 1998; Cai; Wang, 1998; Borges, 2005; Cloern et al., 2014). Por outro lado, a supersaturação de OD (valores negativos de AOU) observada na água superficial da CCL deve estar relacionada à entrada física de OD via ventilação, correntes de marés e aos processos de produção primária fitoplanctônica, como observado em outros sistemas (Testa; Kemp, 2011). No presente estudo, Fontes et al. (2011) e Fonseca (2004) observaram que o balanço de oxigênio da LC foi influenciado pelos processos de produção e decomposição da matéria orgânica, além dos processos físicos de mistura e circulação da água. No presente estudo não foi verificada nenhuma correlação entre o OD e as variáveis bióticas, sugerindo que as forçantes físicas são as principais responsáveis pela dinâmica do OD na coluna d' água, tal como descrito por Knoppers et al. (1984).

As principais entradas de nutrientes para a região central da LC são provenientes do escoamento superficial, efluentes domésticos e mineralização da matéria orgânica (MO) (Fonseca et al., 2002; Fontes et al., 2006). A absorção para a produção

primária e a adsorção geoquímica no sedimento foram relatadas como sendo os principais sumidouros dos nutrientes da LC, já que o sistema apresenta baixa taxa de exportação destes elementos para o oceano adjacente (Fonseca, 2004). A variação temporal dos nutrientes apontou para uma maior concentração no inverno em comparação aos períodos de verão e de outono, esta tendência também foi observada por Fonseca; Braga (2006). Estes autores concluíram que no inverno, o processo de regeneração dos nutrientes é predominante e em contraposição a assimilação pela PP domina no verão. Neste estudo, picos de Chl-*a* foram registrados durante o verão e possivelmente a diminuição nas concentrações de NO_3^- e NH_4^+ esteja associada à assimilação pelo fitoplâncton e bactérias em condições óxicas e anóxicas, como reportado por Fontes; Abreu (2009). Espacialmente, as águas de fundo da CCL funcionam como um recipiente acumulador de material oriundo da laguna, o qual ao ser decomposto enriquece as águas com nutrientes (Odebrecht; Caruso, 1987; Fonseca em prep.; Fontes et al., 2011). Contudo, neste estudo, não foi observado diferenças entre as profundidades, na amostragem de verão e de inverno, de acordo com as concentrações de nutrientes. Ou seja, apesar da água de fundo ser um sítio de mineralização da MO, os nutrientes não estão mais concentrados nesta profundidade. Os nutrientes dissolvidos tendem a sofrer difusão pela diferença de sua concentração entre massas de água adjacentes (Libes, 1992; Libes, 2009). Este processo pode estar promovendo a semelhança entre as concentrações de nutrientes observadas

neste estudo. Isto pode ser reforçado, pois a tendência temporal das concentrações dos nutrientes é semelhante entre as massas de água, indicando uma conexão entre estas profundidades mesmo que distintas fisicamente.

A decomposição da MO envolve reações oxidativas, onde, além do O_2 , o NO_3^- é um potente oxidante, processo em que resulta na redução parcial deste elemento à NH_4^+ , ou a sua redução total à N_2 via denitrificação (Nixon, 1995; Jorgensen, 1996; De Jonge et al., 2002). A partir da década de 90, reportou-se a mudança da principal forma de N no sistema da LC, de NO_3^- para NH_4^+ (NH), fato relacionado com o aumento da densidade populacional e do precário sistema de tratamento de esgoto (Fonseca et al., 2002; Fontes et al., 2006). O NH manteve-se como a forma dominante de N, principalmente no inverno, período em que prevalece a regeneração de nutrientes na LC (Fonseca, 2004). Apesar do potencial estado redutor da LC, seja pela dominância de NH como pela ocorrência de hipoxia, o N se mantém na forma inorgânica dissolvida com mais facilidade do que o P, refletindo na razão NP potencialmente limitante por P para o sistema.

A dinâmica de PID em águas rasas está relacionada à rápida remoção deste nutriente devido a sua alta reatividade geoquímica com a matéria orgânica e os sedimentos, via adsorção (DeBorde et al., 2007). Além disto, quando a assimilação/mineralização associada aos produtores primários domina na dinâmica de nutrientes do sistema, espera-se que a razão NP esteja próximo a de Redfield (Nixon, 1982). A potencial

limitação de PID na LC tem sido relacionada à sua rápida adsorção e sedimentação nas áreas profundas do sistema (Fonseca, 2004). Por outro lado, a dessorção de PID associado aos argilo minerais ocorre em condição de hipo/anoxia, o que pode incrementar a concentração de PID no meio, alterando a razão NP (Bianchi, 2007). Fonseca (2004) observou um pico de PO_4^{3-} ($1,86 \mu\text{M}$) na água de fundo da CCL em condições anóxicas, sugerindo a dessorção deste nutriente do sedimento para a coluna d' água. Contudo, neste estudo não se observou o aumento de PID na água de fundo quando esta se encontrava anóxica. O máximo de PID, como observado pelo MDS, esteve associado às águas de fundo, principalmente na última amostragem de inverno, independente de seu estado de oxidação, indicando que não foi possível estabelecer uma relação direta entre ambiente hipóxico-dessorção neste estudo. O fosfato tem sido considerado como um nutriente indicador de massa de água marinha e os aumentos em suas concentrações podem estar relacionados com a presença da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) e a PRP na região (Braga et al., 2008). Curiosamente, em agosto de 2014, foi observado o maior valor de PO_4^{3-} ($0,45 \mu\text{M}$) na água de fundo óxica com valores médios de temperatura e salinidade (18°C e $30,07 \text{ psu}$), fato que pode estar associado à intrusão da PRP ($0,5 \mu\text{M}$) no sistema, como reportado por Braga et al. (2008).

Por fim, observou-se que a formação da zona hipóxica/anóxica da CCL está associada à estabilidade física da coluna da água, pela variação da salinidade, somada a sua

característica como sítio de depósito e de mineralização do material orgânico autóctone e alóctone. O aumento da intensidade dos ventos no período de outono-inverno favorece a renovação das águas de fundo, alterando o índice de estratificação da coluna da água. Além disto, estas águas parecem ter influência das massas de águas marinhas atuantes na plataforma rasa de SC, como a PRP, que diminui a salinidade e aumenta a concentração de nutrientes no sistema, como reportado em outros estudos no sistema lagunar (Fonseca; Braga, 2006).

REFERÊNCIAS

ARAUJO, M.; NORIEGA, C.; VELEDA, D.; LEFÉVRE, N. Nutrient Input and CO₂ Flux of a Tropical Coastal Fluvial System With High Population Density in the Northeast Region of Brazil. **Journal of Resource and Protection**., v. 5, p. 362-375, 2013.

ASUMPÇÃO, D.T.G.; TOLEDO A.P.P.; D'AQUINO, V.A. Levantamento Ecológico da Lagoa da Conceição (Florianópolis, Santa Catarina) I: Caracterização-Parâmetros Ambientais. **Ciência e Cultura**, 33 (8): 1096-1101 1981.

BIANCHI, T.S. Biogeochemistry of Estuaries. **Oxford University Press**, 706 p, 2007.

BENSON, B.B.; KRAUSE, D.J. The Concentration and Isotopic Fractionation of Oxygen Dissolved in Freshwater and Seawater in Equilibrium With the Atmosphere. **Limnology and Oceanography**, 29 (3): 620-632, 1984.

BORGES, A.V.; SCHIETTECATTE, L.S.; ABRIL, G.; DELLILE, B.; GAZEAU, F. Carbon Dioxide in European Coastal Waters. **Estuarine Coastal Shelf Science**., v. 70, p. 375-87, 2006.

BRAGA, E.S.; CHIOZZINI, V.G.; BERBEL, G.B.B.; MALUF, J.C.C.; AGUIAR, V.M.C.; CHARO, M.; MOLINA, D.; ROMERO, R.; EICHELER, B.B. Nutrients Distribution Over the Southeastern South Atlantic Continental Shelf from Mar del Plata (Argentina) to Itajaí (Brazil): Winter–Summer Aspects. **Continental Shelf Research**., v. 28, p. 1649-1661, 2008.

CAI, W.J.; Wang, Y. The Chemistry, Fluxes, and Sources of Carbon Dioxide in the Estuarine Waters of the Satilla and Altamaha Rivers, Georgia. **Limnol. Oceanogr.**, v. 43, p. 657-68, 1998.

CARTENSEN, J.; CONLEY, D.J.; ANDERSEN, J.H.; ERTEBJERG, G. Coastal Eutrophication and Trend Reversal: A Danish Case Study. **Limnol. Oceanogr.**, v. 51, p. 398-408, 2006.

CLARKE, K.R.; WARWICK, R.M. Change in Marine Communities: An Approach to Statistical Analysis and Interpretation. **Natural Environmental Research Council**, Plymouth, UK, 144 p, 1994.

CRUMP, B.C.; PERANTEAU, C.; BECKINGHAM, B, CORNWEL, J.C. Respiratory Succession and Community Succession of Bacterioplankton in Seasonally Anoxic Estuarine Waters. **Appl. Environ. Microbiol.**, v. 73, p. 6802-6810, 2007.

CRUZ, O. A Ilha De Santa Catarina e o Continente Próximo; Um Estudo de Geomorfologia Costeira. Florianópolis, **Editora da UFSC**, 276 p, 1998.

DEBORDE, J.; ANCHUTZ, P.; CHAILLOU, G.; ETCHEBER, H.; COMMARIEU, M.V.; LECROART, P.; ABRIL, G. The Dynamics of Phosphorus in Turbid Estuarine Systems: Example of the Gironde Estuary (France). **Limnology and Oceanography**., v. 52, p. 862-872, 2007.

De JONGE, V.N.; ELLIOT, M.; & ORIVE, E. Causes, Historical Development, Effects and Future Challenges of a Common Environmental Problem: Eutrophication. In: ORIVE, E.; ELLIOTT, and DE JONGE, V.N. (eds.), *Nutrients and Eutrophication in Estuaries and Coastal Waters. Hydrobiology Special Issue.*, v. 476, p. 1-19, 2002.

DIAZ, R.J.; ROSENBERG, R. Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems. **Science.**, v. 321, p. 926-929, 2008.

DIAZ, R.J. Overview of Hypoxia Around the World. **Journal of Environmental Quality.** v. 30, p. 275-281, 2001.

FONSECA, A.; BRAGA, E.S. Spatial and Seasonal Variation of Dissolved Inorganic Nutrients and Phytoplankton Biomass in the Pelagic System of the Conceição Lagoon, Southern Brazil. **J. Coast. Res.**, v. 39, p. 1229-1233, 2006.

FONSECA, A.L.O.; BRAGA, E.; EICHLER, B.B. Distribuição Espacial dos Nutrientes Inorgânicos Dissolvidos e da Biomassa Fitoplanctônica no Sistema Pelágico da Lagoa da Conceição, Santa Catarina, Brasil (Setembro, 2000). **Atlântica**, Rio Grande, 24 (2): 69-83, 2002.

FONTES, M.L.S.; SUZUKI, M.T.; COTTRELL, M.T.; ABREU, P.C. Primary Production in a Subtropical Stratified Coastal Lagoon, Contribution of Anoxygenic Phototrophic Bacteria. **Microbial Ecology.**, v. 61, p. 223-237, 2011.

FONTES, M.L.S.; ABREU, P.A. Spatiotemporal Variation of Bacterial Assemblages in a Shallow Subtropical Coastal Lagoon in Southern Brazil. **Microbial Ecology**, 58 (1): 140-153 2009.

FONTES M.L.S; CAVELLUCCI R.; LAURENTI, A.; MACHADO, E.C.; CAMARGO, M.G.; BRANDINI, N. Detection of Environmental Impact on Variations in Dissolved Nutrients and Chl-A in the Conceição Lagoon, Florianópolis, SC, Brazil. **J Coast Res.**, v.39, p. 1407-1412, 2006.

GALE, E.; PATTIARATCHI, C.; RANASINGHE, R. Vertical Mixing Processes in Intermittently Closed and Open Lakes and Lagoons, and the Dissolved Oxygen Response. **Estuarine Coastal and Shelf Science**., v. 69, p. 205-216, 2006.

GATTUSO, J.P.; FRANKIGNOULLE, M.; WOLLAST, R. Carbon and Carbonate Metabolism in Coastal Aquatic Ecosystems. **Annu. Rev. Ecol. Syst.**, v. 29, p.405-34, 1998.

GILBERT, D.; RABALAIS, N.N.; DÍAZ, R.J.; ZHANG, J. Evidence for Greater Oxygen Decline Rates in the Coastal Ocean Than in the Open Ocean. **Biogeosciences**., v. 7, p. 2283-2296, 2010.

GRASSHOFF, K.; EHRHARDT, M.; KREMLING, K. Methods of Seawater Analysis. 2ed. **Verlag Chemie**, Weinheim, 419 p, 1983.

GRAY, J.S.; Wu, R.S.; Or, Y.Y. Effects of Hypoxia and Organic Enrichment on The Coastal Marine Environment. **Mar. Ecol. Progr. Ser.**, v. 238, p. 249-279, 2002.

GUPTA, G.V.M.; SARMA, V.V.S.S.; ROBIN, R.S.; RAMAN, A.V.; JAIKUMAR, M.; RAKESH, M.; SUBRAMANIAN, B.R. Influence of Net Ecosystem Metabolism in Transferring Riverine Organic Carbon to Atmospheric CO₂ in a Tropical Coastal Lagoon (Chilka Lake, India). **Biogeochemistry**, 87(3): 265-285, 2008.

HSIEH, W.C.; CHEN, C.C.; SHIAH, F.K.; HUNG, J.J.; CHIANG, K.P.; MENG, P.J.; FAN, K.S. Community Metabolism in a Tropical Lagoon: Carbon Cycling and Autotrophic Ecosystem Induced by a Natural Nutrient Pulse. **Environmental Engineering Science**., 29(8): 776-782, 2012.

HYAN,M.; HOWARTH, R.; MARINO,R.; GANJU,N.; BERG, P.; FOREMAN, K.H.; GIBLIN, A.E.; McGLATHERY, K. Exchange in the Nitrogen and Phosphorus Between a Shallow Lagoon and Coastal Waters. **Estuaries and Coasts**., v. 37, p. 63-73, 2014.

JORGENSEN, E. Material Flux in the Sediment. In: Jorgensen B. & Richardsonk. (eds). **Coastal and estuarine studies**., p. 115-135, 1996.

KNOPPERS, B.A.; OPITZ, S.S.; DE SOUZA, M. P.; MIGUEZ, C.F. The Spatial Distribution of Particulate Organic Matter and Some Physical and Chemical Water Properties in Conceição Lagoon; Santa Catarina, Brazil (July 19, 1982). **Arquivos de Biologia e Tecnologia**, 27 (1): 59-77, 1984.

LIBES, S. M. Introduction to Marine Biogeochemistry. **Academic Press**, p. 928, 2009.

LIBES, S.M. An Introduction to Biogeochemistry. New York, **John Wiley and Sons**, p. 734, 1992.

LIU, M.; XIAO, T.; WU, Y.; FENG, Z.; HUANG, H.; BAO, S.; ZHANG, W. Temporal Distribution of Bacterial Community Structure in the Changjiang Estuary Hypoxia Area and Adjacent East China Sea. **Environmental Research Letters**, 7(2): 11p, 2012.

MCGLATHERY, K.J.; ANDERSON, I.C.; TYLER, A.C. Magnitude and Variability of Benthic and Pelagic Metabolism in a Temperate Coastal Lagoon. **Marine Ecology**, v. 216, p. 1-15, 2001.

MÖLLER Jr., O.O.; PIOLA, A.R.; FREITAS, A.C.; CAMPOS, E.J.D. The Effects of River Discharge and Seasonal Winds on the Shelf off Southeastern South America. **Continental Shelf Research**, v. 28, p. 1607-1624, 2008.

MUEHE, D.; CARUSO GOMES JR. F. Batimetria e Algumas Considerações Sobre a Evolução Geológica da Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina. **GEOSUL**. Florianópolis, 4(7): 32-44, 1989.

NOGUEIRA, E.; PEREZ, F.F.; RIOS, A.F. Seasonal Patterns and Long-Term Trends in an Estuarine Upwelling Ecosystem (Ría De Vigo, NW Spain). **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 44, p. 285-300.

NEWTON, A.; ICELY, J.D.; FALCÃO, M.; NOBRE, A., NUNES, J.P.; FERREIRA, J.G.; VALE, C. Evaluation of the Eutrophication

in the Ria Formosa Coastal Lagoon, Portugal. **Continental Shelf Research.**, v. 23, p. 1945-1961, 2003.

NIXON, S.W. Coastal Marine Eutrophication: A Definition, Social Causes, and Future Concerns. **Ophelia.**, v. 41, p. 199-219, 1995.

NIXON, S.W. Nutrients Dynamics, Primary Production and Fisheries Yields of Lagoons. **Oceanologic Acta** Especial Edition: Proceedings International Symposium on Coastal Lagoons. University of Rhode Island, p. 357-371, 1982.

ODEBRECHT, C. Variações Espaciais e Sazonais do Fitoplâncton, Protozooplâncton e Metazooplâncton na Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina, Brasil. **Atlântica.**, v. 10, p. 21-40, 1988.

ODEBRECHT, C.; CARUSO GOMES Jr. F. Hidrografia e Matéria Particulada em Suspensão na Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil. **Atlântica**, Rio Grande., 9(1): 83-104, 1987.

PIOLA, A.R.; MÖLLER, Jr. O.O.; GUERRERO, R.A. CAMPOS, E.J.D. Variability of the Subtropical Shelf Front of Eastern South America: Winter 2003 and Summer 2004. **Continental Shelf Research.**, v. 28, p. 1639-1648, 2008.

PIOLA, A.R.; CAMPOS, E.J.D.; MÖLLER Jr., O.O.; CHARO, M.; MARTINEZ, C. Subtropical Shelf Front of Eastern South America. **Journal of Geophysical Research.**, v. 105, p. 6565-6578, 2000.

QUIJANO-SCHEGGIA, S.; OLIVOS-ORTIZ, A.; GAVIÑO-RODRIGUEZ, J.H.; CASTRO-OCHOA, F.; RIVERA-VILARELLE, M.; PATIÑO-BARRAGAN, M. First Report of *Pseudo-Nitzschia Brasiliana* and *P. Micropora* (Bacillariophyceae) Found in Cuyutlan Lagoon, Mexico. **Revista de Biología Marina y Oceanografía.**, 46(2): 189-197, 2011.

RABALAIS, N.N.; DIAZ, R.J.; LEVIN, L.; TURNER, R.E.; GILBERT, D. & ZHANG, J. Dynamics and Distribution of Natural

and Human-Caused Hypoxia. **Biogeosciences.**, v. 7, p. 585-619, 2010.

RABALAIS, N.N. **In the Global Coastal Ocean: Multiscale Interdisciplinary Processes. In: Eutrophication.** Harvard University Press, Cambridge, MA, p. 819–865, 2004.

RABALAIS, N.N.; TURNER, R.E. Hypoxia in the Northern Gulf of Mexico: Descriptions Causes and Change. In: Rabalais, N.N. & Turner, R.E. Coastal Hypoxia: Consequences for living resources and ecosystems. **American Geophysical Union**, 1-36, 2001.

RABALAIS, N.N.; TURNER, R.E.; DIAZ, R.J.; JUSTIC´, D. Global Change and Eutrophication of Coastal Waters. **Journal of Marine Science.**, v. 66, p. 1528-1537, 2009.

RABALAIS, N. N.; TURNER, R. E.; WISEMAN Jr. W. J.; DORTCH, Q. Consequences of the 1993 Mississippi River Flood in the Gulf of Mexico, **Regulated Rivers Res. Manag.**, v.14, p. 161–177, 1998

RENAUD, M. Hypoxia in Louisiana Coastal Waters During 1983 Implications for Fisheries, **Fish. Bull.**, v. 84, p. 19-26, 1986.

SELMAN, M.; GREENHALGH, S.; DIAZ, R.; SUGG, Z. Eutrophication and Hypoxia in Coastal Areas: A Global Assessment of the State Of Knowledge. Water Quality: **Eutrophication and Hypoxia Policy Note Series.**, v. 1, p. 1-6, 2008.

SIERRA DE LEDO, B.; SORIANO-SIERRA. Atributos e Processos Condicionantes da Hidrodinâmica na Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina, Brasil. **ACIESP.**, v. 2, p. 113-121, 1994.

SOUZA SIERRA, M.M.; SORIANO-SERRA, E.J.; SALIM, J.R.S. Distribuição Espacial e Temporal dos Principais Nutrientes e Parâmetros Hidrológicos da Lagoa da Conceição. **An. Cient. UNALM.**, v. 2, p. 19-32, 1987.

SOZA-AVALOS, R.; GAXIOLA-CASTRO, G.; OLIVOS-ORTIZ, A.; SILVIA-IÑIGUEZ, L. Nutrientes Inorgánicos Y Producción del Fitoplâncton em uma Laguna Costera Subtropical de Mexico. **Revista de Biología Marina y Oceanografía.**, v. 48, p. 143-154, 2013.

SMITH, S.V.; MACKENZIE, F.T. The Ocean as a Net Heterotrophic System: Implications from the Carbon Biogeochemical Cycle. **Glob. Biogeochem. Cycles.**, v. 1, p.187-98,1987.

STECKBAUER, A.; DUARTE, C.M.; CARSTENSEN, J.; VAQUER-SUNYER, R.; CONLEY, D.J. Ecosystem Impacts of Hypoxia: Thresholds of Hypoxia and Pathways to Recovery. **Environmental Research Letters**, 12 p, 2011.

STRAMMA, L.; JOHNSON, G. C.; SPRINTALL, J.; MOHRHOLZ, V. Expanding Oxygen-Minimum Zones in the Tropical Oceans. **Science.**, v. 320, p. 655-658, 2008.

ZANCHETTIN, D.; TRAVERSE, P.; TOMASINO, M. Observations on Future Sea Level Changes In the Venice Lagoon. **Hydrobiologia**, v. 577, p. 41-53, 2007.

ZHANG, J., D.; GILBERT, A.J.; GOODAY, L.; LEVIN, S.W.A.; NAQVI, J. J. Natural and Human-Induced Hypoxia and Consequences for Coastal Areas: Synthesis and Future Development. **Biogeosciences**, v. 7, p. 1443–1467, 2010.

3 CAPÍTULO 2 - DINÂMICA DO CARBONO EM UMA LAGUNA ESTRATIFICADA NO SUL DO BRASIL

RESUMO

Este estudo investigou a dinâmica e fixação do carbono (C) e os fluxos de CO₂ na interface ar-água na região central (CCL) de uma laguna subtropical (Lagoa da Conceição, LC) no sul do Brasil, a qual apresenta estratificação permanente da coluna d' água e eventos sazonais de hipoxia e anoxia nas águas de fundo. As amostragens foram realizadas em 3 dias do verão, outono e inverno, onde as águas de superfície, haloclina e fundo foram coletadas em um ponto da CCL. A CCL agiu como sumidouro de CO₂ em todos os períodos. A fixação do carbono no claro (PPL) nas águas de superfície esteve associada com a clorofila (Chl-*a*), a PAR incidente na coluna d' água, silicato e com o fluxo do CO₂, no verão ocorreram as maiores taxas nesta massa de água (208,8 ± 59,2 mg C m⁻³ h⁻¹). A entrada do carbono orgânico dissolvido (COD) e particulado (COP) no sistema foi principalmente autóctone, devido a forte correlação com a Chl-*a* encontrada, com concentrações mais elevadas nas águas de superfície e fundo no verão. A elevada carga de matéria orgânica (MO) nas águas de fundo no verão, juntamente com a ausência de luz, contribuíram para a formação dos eventos de hipoxia no sistema e onde foi notada a maior fixação do C no escuro (PPD). As águas de fundo demonstraram as maiores concentrações do carbono inorgânico dissolvido (CID) e da pCO₂, prevalecendo no outono e inverno quando os processos de mineralização dominam na CCL. Assim, a dinâmica e fixação do C na CCL é regulada principalmente por processos biológicos.

Palavras-chave: Fluxo de CO₂ ar-água. Fixação do C. Carbono orgânico; PAR. Hipoxia.

3.1 INTRODUÇÃO

Ecossistemas costeiros desempenham um papel importante no ciclo global do carbono, pois tendem a equilibrar o excesso deste elemento emitido pela atividade antrópica para a atmosfera via difusão molecular na interface ar-água (Siegenthaler and Sarmiento, 1993; Chen et al, 2003; Libes, 2009). Quando o CO_2 interage com a água do mar, o ácido carbônico (H_2CO_3) é formado e pelos processos de dissociação ocorre um aumento na concentração de prótons $[\text{H}^+]$, redução do pH e dos íons carbonatos $[\text{CO}_3^-]$, afetando organismos que dependem deste composto para sua sobrevivência (Bianchi, 2007; Feely et al., 2009). Além das trocas de CO_2 com a atmosfera e dos processos físico-químicos na água do mar, os processos biogeoquímicos de produção e respiração da matéria orgânica são também importantes para o ciclo deste elemento (Bianchi, 2007; Sabine et al., 2007; Canuel et al., 2012). A produção primária líquida, considerada uma importante fonte de carbono orgânico dissolvido e particulado (COD e COP) para os ecossistemas marinhos, assimila o CO_2 (CID) presente na coluna d' água, reforçando estes sistemas como sumidouros de CO_2 atmosférico (Caffrey, 2004; Libes, 2009; Chavez et al., 2010). Estes autores, por outro lado, demonstram que se as taxas de respiração (heterotrofia) excederem as da produção (autotrofia) haverá uma supersaturação de CO_2 na água e o ambiente se tornará fonte de CO_2 para a atmosfera.

Atividades antrópicas têm contribuído para agravar os processos de eutrofização em sistemas costeiros, pelo aumento na carga de P e N, bem como, nas taxas de produção e acúmulo de carbono (Nixon, 1995; Cloern, 2001; Rabalais et al., 2010; Smith et al., 2012; Cloern et al., 2014). Lagunas costeiras que apresentam estratificação física da coluna d' água e maior tempo de residência das águas permitem uma maior concentração de COD, COP e CID, devido às elevadas taxas de produção primária (PP) e respiração (Nixon, 1982; Middelburg and Levin, 2009; Rabalais et al, 2010). Estes sistemas podem desenvolver hipoxia se o oxigênio não for fornecido à água de fundo, por processos de mistura vertical e advecção, para decompor a alta concentração de matéria orgânica autóctone e alóctone acumuladas nos sedimentos (Vaquer-Sunyer and Duarte 2008; Eldridge and Morse, 2008; Eldridge and Roelke, 2010 Rabalais et al., 2010;). Em sistemas costeiros de alta produtividade e que apresentam eventos de hipoxia, espera-se um aumento significativo não linear na $p\text{CO}_2$ e diminuição da saturação da calcita e aragonita, em consequência disto, é esperado a perda de habitat para a comunidade bentônica e de peixes que vivem no fundo, aumento da mortalidade e da predação, alterações na transferência da energia trófica, diminuição de recursos alimentares (Melzener et al., 2013; Gattuso et al., 2013).

A variabilidade temporal e espacial da produção primária é regulada pela interação de fatores abióticos (fluxo de nutrientes, disponibilidade de luz e processos físicos) e bióticos (predação e competição) (Nixon, 1982; Abreu et al., 1994; Chavez et al.,

2010; Kennish and Paerl, 2010). Seguindo a classificação de Nixon (1995), a média da produção primária pelágica em sistemas costeiros mesotróficos é em torno de $0,36 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ na laguna de Dzilama, península de Yucatan (Medina-Gomez and Herrera-Silveira, 2006), $0,62 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, no estuário de São Francisco, Califórnia (Parker et al., 2012) e $0,86 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, na península de Saanich, Canadá (Grundle et al., 2009). Para sistemas eutrofizados, as taxas médias variam de $1,4 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, golfo de Trieste, Itália (Umani et al., 2012) a $1,3 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, no estuário de Scheldt (Cloern et al., 2014) e em sistemas hipertróficos em médias as taxas de produção primária variam de $2 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ na baía de Massachusetts em 2005, EUA, (Cloern et al., 2014), $4,7 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ na laguna de Dapeng, Taiwan (Hsieh et al., 2012), $5,3 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, no estuário de Tamagawa, Japão (Yamaguchi et al, 1991) a $7,28 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ na lagoa Chiku, Tailândia (Lin et al. 2001). Em estuários, lagoas e baías da costa brasileira, a média da produção primária pelágica varia em torno de $0,2 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, estuário (oligotrófico) de Cananéia, (SP) (Barrera-Alba, et al., 2006), $0,62 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, estuário (mesotrófico) de Paranaguá (PR) (Brandini 2002), $0,7 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, baía (mesotrófica) de Todos os Santos, (BH) (Souza et al., 2012) a $2,3 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, baía de Guanabara (hipertrófica), (RJ) (Soares, 2006). No entanto, estudos que avaliem o metabolismo de ambientes costeiros sob diferentes condições de oxirredução têm sido pouco reportados.

As águas hipóxicas e/ou anóxicas da Lagoa da Conceição (LC) são formadas devido à estratificação física permanente da

coluna d' água e elevada carga de matéria orgânica alóctone e autóctone (Odebrecht & Caruso 1987; Sierra de Ledo & Soriano-Sierra 1994). Neste sistema, a produção primária tem sido reportada com valores entre $0,54 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Fonseca, 2004) a $1,59 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Knoppers and Kjerfve, 1999). Sazonalmente, Fontes et al. (2011), reportaram que no período de verão nas águas de fundo da CCL, a fixação de carbono atingiu um valor máximo de $1,5 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, o que esteve associado com a produção de oxigênio e elevada biomassa fitoplanctônica. Estes autores ainda verificaram que quando a incidência da luz diminuiu (outono) e as águas de fundo estavam em condições subóxicas, a taxa de fixação de C foi o dobro do verão ($3,0 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) devido o aumento das bactérias anaeróbicas fotoautotróficas anoxigênicas (AnAnP). Em ambientes redutores, como observados sazonalmente na CCL, técnicas para avaliar a fixação de C devem ser independentes do balanço de oxigênio dissolvido, já que muitas vezes os organismos anoxigênicos são responsáveis por 30% ou mais da produção total da matéria orgânica (Pimenov et al., 2008).

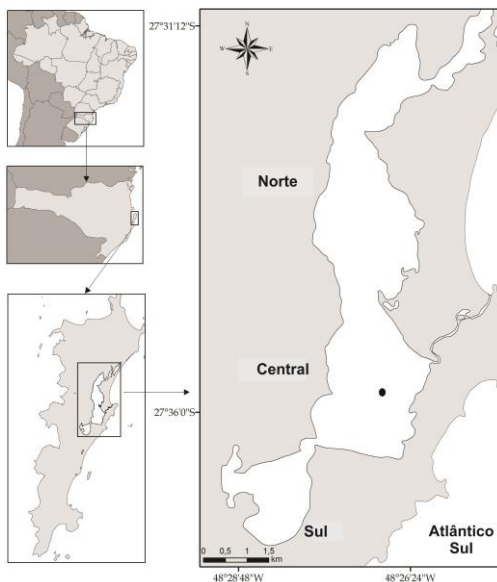
Assim, este estudo pretendeu avaliar a dinâmica e fixação do carbono em diferentes condições de oxirredução que ocorre na região central da LC.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1 Área de Estudo

A Lagoa da Conceição (LC) situa-se na porção centro-leste da Ilha de Santa Catarina entre as coordenadas 27°34'S e 48°27'W (Fig. 6). Integra uma laguna semi-fechada, cuja bacia hidrográfica possui uma área de 80,23 Km² (Porto-Filho, 1993). É interligada ao Oceano Atlântico por um canal de 2,8 Km de comprimento (aberto em 1982), sendo determinante na renovação das águas do sistema lagunar. (Odebrecht e Caruso Jr., 1987; Fonseca e Braga, 2006). A matéria orgânica sedimentar alóctone na laguna é proveniente da vegetação ao redor da LC, a qual é composta pela Floresta Ombrófila Densa, vegetação de restinga e por *Pinus* (espécie exótica), os dinoflagelados, bactérias e diatomáceas são considerados os principais organismos que compõem a matéria orgânica autóctone (Puhl et al., 2012). Esta laguna tem sido setorizada em três regiões devido as características físicas e química da água: Norte, Central e Sul (Assumpção et al., 1981; Knoppers et al., 1984; Souza-Sierra et al., 1987; Muehe e Caruso Jr. 1989; Fonseca e Braga, 2006; Fontes 2004;). A região Central (CCL) inclui o canal de acesso permanente ao mar aberto, apresenta estratificação salina e eventos sazonais de hipoxia e/ou anoxia. No entanto, picos de Chl-*a* (1.604 e 32,5 µg L⁻¹) foram observados nas águas de fundo anóxicas desta região quando a luz atingiu toda a coluna d' água (Odebrecht e Caruso Jr., 1987; Fontes, 2004).

Figura 6 - Localização do ponto amostral ($27^{\circ}35'57,8$ S e $48^{\circ}26'50,4$ O) na região Central da Lagoa da Conceição (●), leste da ilha de Santa Catarina, Florianópolis (SC).



Fonte: Modificado de Fontes e Abreu, 2009.

3.2.2 Desenho Amostral e Análises

A fixação do carbono e a concentração da biomassa fitoplanctônica e das formas de carbono foram avaliados em três datas diferentes nos períodos de verão (21/1/2014, 5/2/2014, 25/2/2014), do outono (8/5/2014, 15/5/2014, 27/5/2014) e do inverno (10/7/2014, 30/7/2014, 14/8/2014). A amostragem ocorreu em um ponto fixo ($27^{\circ}35'57,8$ S e $48^{\circ}26'50,4$) na região central da Lagoa da Conceição (CCL) (Fig. 6).

O perfil de salinidade e de temperatura (termosalinômetro YSI 300, mod. EC) foi avaliado *in situ* para identificar as massas de água a cada 0,5 m de profundidade. Concomitante, mediu-se a concentração de oxigênio dissolvido-OD (oxímetro YSI, mod. 55), o pH (pHmetro YSI, mod. Ecosense 100 A, precisão 0,01) e a radiação fotossinteticamente ativa (PAR, $\mu\text{mol. m}^{-2}\text{s}^{-1}$, LI Cor mod. 2501 Biosciences), a qual também foi avaliada na atmosfera superficial. O critério utilizado para caracterizar hipoxia neste estudo foi a concentração de OD $< 2 \text{ mg. L}^{-1}$ (Renaud et al., 1986; Rabalais et al., 1991; Rabalais et al., 2010).

A partir da definição das massas de água, a água de subsuperfície, da halolcina e de fundo foi amostrada com garrafa de Van Dorn de 3L, provida de fechamento horizontal e redutor de turbulência. Estas águas foram utilizadas para estimar a fixação de carbono, bem como as concentrações das diferentes formas: Carbono inorgânico Dissolvido (CID), Carbono orgânico particulado (COP) e orgânico dissolvido (COD). Além disto, avaliou-se a concentração dos nutrientes inorgânicos dissolvidos e da biomassa de produtores primários.

3.2.3 Fixação do Carbono pelo Método do Isótopo Estável ^{13}C

Assim que a amostra chegava à embarcação, alíquotas de 100 ml de água foram cuidadosamente transferidas para frascos de DBO de borosilicato, sendo dois para avaliar a fixação do carbono no claro e dois para avaliar a fixação no escuro, o qual

era totalmente envolvido em papel alumínio. Em cada frasco adicionou-se 0,1 ml de $^{13}\text{C}\text{-Na}_2\text{CO}_3$, cuja concentração final de ^{13}C foi de $300\ \mu\text{mol } ^{13}\text{C L}^{-1}$, em média. A incubação iniciou-se entre 10:00 e 10:30 e foi finalizada após 3 horas. Após o experimento, as amostras foram fixadas com 0,5 ml de HCl 1N e mantidas resfriadas e no escuro. Em laboratório, as amostras foram filtradas em microfiltro de fibra de vidro GF/F (Whatman) calcinados, os filtros foram lavados com água da LC filtrada e acidificada até o pH 2-3. Após este procedimento, os filtros foram colocados para secar em estufa a $60\ ^\circ\text{C}$ por 24 horas (Pimenov et al., 2008).

Para quantificar a concentração natural de ^{13}C no material particulado incubado, uma nova alíquota de 100 ml da água amostrada foi transferida para frascos de polietileno (transparentes) e, imediatamente, acidificadas com 0,5 ml de HCl 1N. Em laboratório foi seguido o mesmo procedimento de filtração e procedimento com o filtro como descrito anteriormente. Para avaliar a composição isotópica do carbono inorgânico dissolvido ($\delta^{13}\text{CID}$) em cada amostra, uma alíquota de 20 ml de água foi transferida para frascos âmbar e imediatamente fixada com 0,2 ml de cloreto de zinco a 50% (ZnCl_2), inibindo assim as atividades biológicas, sendo mantidas sob refrigeração (4°C).

Todos os procedimentos de amostragem e preservação da amostra para análise isotópica seguiram os protocolos do laboratório Stable Isotope Facility da University of California, para onde foram enviadas para as devidas análises em espectrômetro de massa de razão atômica (Elementar Vario EL Cube). As taxas

de fixação do carbono foram calculadas conforme metodologia descrita em Pimenov et al. (2008), verificar anexo para detalhamento.

3.2.4 Carbono Orgânico Total (COT), Orgânico Dissolvido (COD) e Inorgânico Dissolvido (CID)

Para a análise do COT, as amostras (60 ml) foram transferidas para frascos âmbar e mantidas refrigeradas até o laboratório, onde foram imediatamente congeladas à -20°C. As amostras para análise do COD foram acondicionadas em frascos de polietileno (pré-lavados) e mantidas resfriadas até o laboratório, onde foram filtradas em microfiltro de fibra de vidro GF/5 (Macherey-Nagel de 0,45 µm de porosidade), pré-calcinado por 4 horas a 550°C, e seguiram o mesmo procedimento de preservação descrito para o COT (Farmer e Hansell, 2007). Estas amostras foram analisadas em triplicata por um analisador de carbono total (TOC-L Shimadzu) pelo método de combustão catalítica (680°C) com detecção por infravermelho não dispersivo (NDIR). Amostras padrões provenientes do laboratório de Hansell calibraram o equipamento antes das amostras serem analisadas. O carbono orgânico particulado (COP) foi calculado pela diferença entre o COT e COD.

Uma alíquota de 10 ml (em duplicata) foi fixada em campo com 1 ml de HCl (0,01 M) e mantidas no escuro até serem analisadas em laboratório para a determinação da alcalinidade e da concentração do CID ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} + \text{CO}_2$), seguindo o

método da curva de Gran descrito em Gran (1952). A amostra de água (10 ml) foi titulada com uma precisão padronizada de 0,01 M de HCl, quando o valor de pH foi estabilizado (inferior a 4), 3 leituras foram feitas para a construção da tabela. As medições de pH, salinidade e temperatura *in situ* foram utilizadas para os devidos cálculos, o qual foi realizado pelo link: <http://or.water.usgs.gov/alk/methods.html#gran>.

3.2.5 Pigmentos Fotossintetizantes e Nutrientes Inorgânicos

As amostras para Chl-*a* e nutrientes inorgânicos dissolvidos foram transferidas para frascos de polietileno (pré-lavados) e mantidas no escuro e resfriadas até o laboratório. Alíquotas de 300 ml foram filtradas em filtros GF/5 (Macharey-Nagel de 0,45 µm de porosidade), os filtros e o filtrado foram processados e congelados a -20°C até o momento das análises conforme Grassholff et al. (1983).

Os pigmentos, clorofila-*a* (Chl-*a*) e feofitina (Feo-*a*), foram extraídos em acetona a 90% (v/v) durante um período de 24 horas sob refrigeração de 4°C e no escuro. As concentrações foram determinadas a partir da absorbância 665 e 750nm (correção para turbidez), através do espectrofotômetro (mod. Biospectro SP-120), com uso de cubeta de 5 cm de passo óptico, seguindo o método de Lorenzen descrito em Strickland e Parsons (1972).

As concentrações dos nutrientes fosfato (PO_4^{3-}), nitrato (NO_{3+2}), o qual é a somado com o nitrito (NO_2^-), amônio (NH_4^+) e

silicato (SiO_2) foram determinadas de acordo com Grasshoff et al. (1983) utilizando-se espectrofotômetro Hitachi (UV 2900, provido de sipper).

3.2.6 Fluxo do CO_2 na Interface Ar-Água

O fluxo do CO_2 (F_{CO_2}) na interface atmosfera-água foi calculado sazonalmente (verão, outono e inverno) utilizando a equação a seguir:

$$F = \alpha k (\Delta p \text{CO}_2) \quad (1)$$

Onde,

$\Delta p \text{CO}_2$ = diferença da pressão parcial ($p \text{CO}_2 \mu\text{atm}$) do CO_2 na atmosfera e na água;

α = coeficiente de solubilidade ($10^{-2} \text{ mol l}^{-1} \text{ atm}^{-1}$) do CO_2 que é dependente da salinidade e temperatura (Weiss, 1974);

k = velocidade de transferência do gás (cm h^{-1}) (Liss and Merlivat, 1986) foi calculado de acordo com a fórmula:

$$k = (2,85u - 9,65) (660/\text{Sc})^{0,5} \quad (2)$$

(ventos entre $3,6 < u < 13 \text{ m s}^{-1}$)

Onde, u é a velocidade do vento (m s^{-1}) no momento da amostragem e o número de Schmidt (Sc) (Wanninkhof, 1992) foi calculado pela fórmula a seguir:

$$Sc = A - Bt + Ct^2 - Dt^3 \quad (3)$$

Onde, $A = 1992,1$, $B = 121,86$, $C = 3,54$, $D = 0,004227$ e t ($^{\circ}\text{C}$) = temperatura da água.

A $p\text{CO}_2$ na atmosfera foi adquirida por medições próximas a área de estudo com o equipamento IRGA (mod. EGM-4 Environmental Gas Monitor for CO_2), o qual utiliza técnicas de infravermelho para análises de gases. A $p\text{CO}_2$ na água foi medida seguindo o método de Gran descrito em Gran (1952). As medições de pH, salinidade e temperatura *in situ* foram utilizadas para o devido cálculo, o qual foi realizado pelo link: <http://or.water.usgs.gov/alk/methods.html#gran>.

Esta equação implica que os fluxos que ocorrem da atmosfera para a água de superfície (laguna é sumidouro de CO_2) são indicados com um sinal negativo, ao passo que os fluxos da água para a atmosfera (laguna é fonte de CO_2) são indicados com um sinal positivo.

3.2.7 Análise dos Dados

A utilização aparente do oxigênio (UAO) em porcentagem de saturação (%) foi calculada de acordo com Benson e Krause (1984). A salinidade, temperatura, PAR OD, UAO, $p\text{CO}_2$, CID, COD, COT, Chl-*a*, PPL e PPD, foram representadas pelo Ocean Data View (ODV) (Schlitzer, 2009) e foram interpoladas usando o método Gridding Diva.

A análise de variância (ANOVA- two-way) foi utilizada para testar as diferenças significativas ($p < 0,001$) espaciais (entre profundidade) e temporais (entre períodos de coleta) das variáveis OD, PAR, salinidade, temperatura e CID, os quais entraram no pressuposto da análise. O teste de Cochran foi utilizado para verificar a homogeneidade da variância. A comparação entre as médias de cada fator foi feita pelo teste post-hoc SNK. Correlação de Pearson foi calculada para avaliar a relação das variáveis abióticas e bióticas considerando todos os dados (períodos e profundidades) e os dados de cada massa de água (superfície, haloclina e fundo). A análise de escalonamento multidimensional (MDS), com base na distância Euclidiana e com correlação de Spearman ($r > 0,01$), foi utilizada gerando uma representação gráfica de similaridade (ou distância) das variáveis abióticas e bióticas entre as escalas temporais e espaciais. O *stress* = 0,1 é considerado satisfatório para a representação dos dados no plano (Clarke e Warnick, 1994).

3.3 RESULTADOS

Os resultados neste estudo foram apresentados em valores médios e desvio padrão.

3.3.1 Dinâmica do Carbono

A concentração de CID predominou no pool de carbono do sistema, representando 63% do carbono total. Distribuições

desta forma de carbono demonstraram diferenças significativas espaciais ($p < 0,001$; $n=9$), com a maior concentração na água de fundo ($573,8 \pm 57,5 \mu\text{M}$) (Fig. 7) As menores concentrações de CID foram observadas nas águas de superfície ($430 \pm 43,3 \mu\text{M}$) e estiveram associadas a sua fixação pela PP, ao apresentaram correlação inversa com a PPD ($r=-0,52$ $p < 0,05$) e com a Chl-*a* ($r=-0,57$ $p < 0,05$). O COD dominou a forma de carbono orgânico no ambiente, representando em média 64% do COT e diminuindo a sua contribuição do verão ($69 \pm 20\%$) para o inverno ($56 \pm 26 \%$). As águas de superfície, no período de verão, apresentaram as maiores concentrações de COD, $313,0 \pm 38,6 \mu\text{M}$, e COP, $722,6 \pm 664,0 \mu\text{M}$ (Fig. 8). No inverno, as maiores concentrações do carbono orgânico (COD, $40,3 \pm 29,3 \mu\text{M}$ e COP, $121,6 \pm 70,5 \mu\text{M}$) foram observadas nas águas de fundo (Fig. 8).

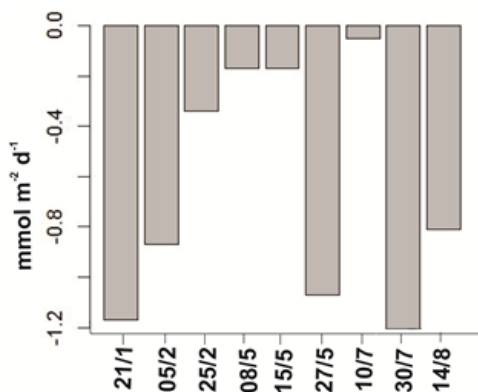
3.3.2 $p\text{CO}_2$ na coluna D'água e Fluxos de CO_2 na Interface Ar-Água

De um modo geral, a $p\text{CO}_2$ apresentou correlação positiva com a Feo-*a* ($r= 0,62$ $p < 0,001$) e salinidade ($r= 0,47$ $p < 0,05$). O valor observado foi de $351,5 \pm 203,5 \mu\text{atm}$ (Fig. 8). Em relação as massas de água, nas águas de superfície a $p\text{CO}_2$ sempre esteve abaixo do equilíbrio atmosférico ($243,1 \pm 86,3 \mu\text{atm}$), diminuindo do outono para o verão (Fig. 8). Esta tendência pode ser verificada para as águas de haloclina, somente o período de outono apresentou valores acima do equilíbrio atmosférico ($444,2$

$\pm 10,7 \mu\text{atm}$) (Fig. 8). Por outro lado, a $p\text{CO}_2$ nas águas de fundo, sempre esteve acima do equilíbrio atmosférico, indicando supersaturação de CO_2 (outono $614,2 \pm 187,6 \mu\text{atm}$ e inverno $472,8 \pm 164,5 \mu\text{atm}$), exceto no período de verão em que o valor foi de $337,2 \pm 288,7 \mu\text{atm}$ (Fig. 8). Nesta massa de água, a $p\text{CO}_2$ se correlacionou positivamente com a Chl-*a* ($r=0,5$ $p<0,05$) e a PPL ($r=0,65$ $p<0,001$).

Em relação aos fluxos (FCO_2) na interface ar-água, a região central da LC agiu como sumidouro de CO_2 para a atmosfera em todos os períodos amostrados. O período de verão apresentou os maiores valores ($-0,8 \pm 0,4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), seguindo do inverno ($-0,7 \pm 0,5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) (Fig. 2). Neste estudo o FCO_2 apresentou correlação positiva com a Chl-*a* ($r=0,72$ $p<0,001$), PPL ($r=0,51$ $p<0,05$) e PPD ($r=0,63$ $p<0,05$).

Figura 7 - Valores de fluxos de CO_2 ($\text{mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) na interface ar-água nos períodos de verão (21/1, 05/2, 25/2), outono (08/5, 15/8, 27/5) e inverno (10/7, 30/7, 14/8) na região central da LC (SC). Valores negativos indicam fluxo da atmosfera para a coluna d'água.



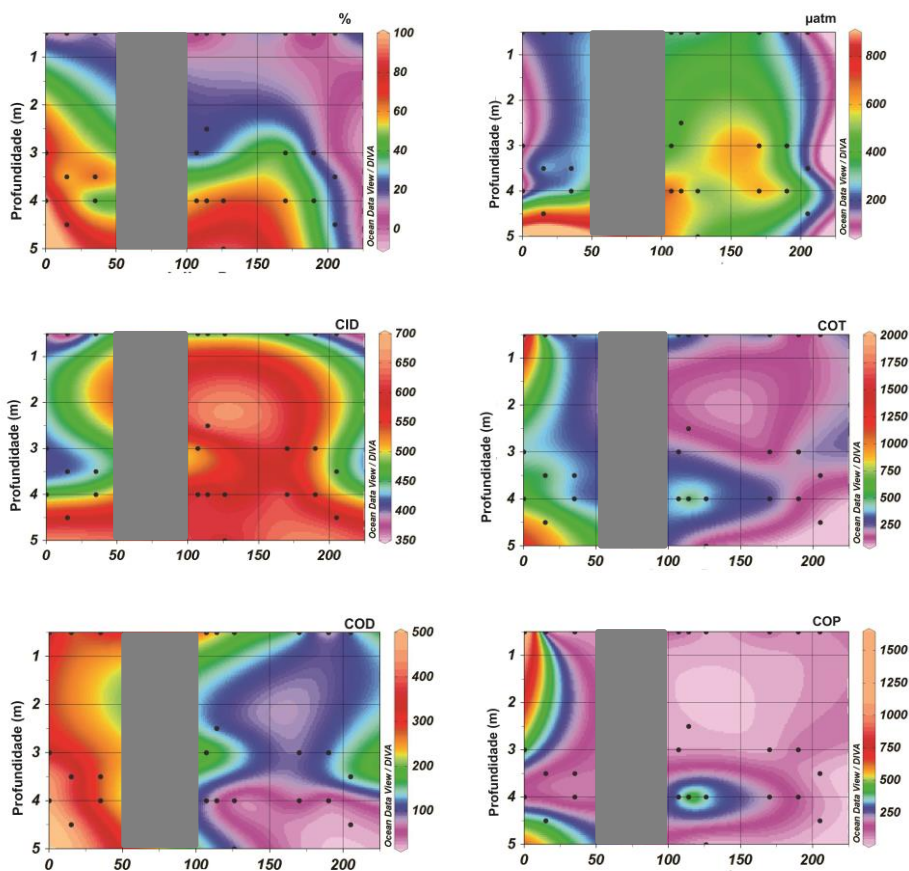
3.3.3 Fixação do Carbono na Luz

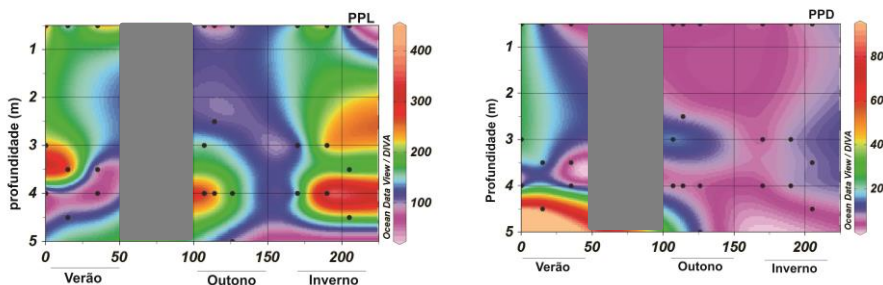
A incorporação do carbono na luz predominou nas águas de fundo no inverno ($235,6 \pm 145,0 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$) e de superfície no verão ($208,8 \pm 59,2 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$). Os menores valores foram observados no período de verão para as águas de fundo ($76,6 \pm 37,7 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$) (Fig. 8), concomitante com a menor incidência da luz ($0,6 \pm 0,4\%$). Considerando somente as águas de fundo, a PPL se correlacionou positivamente com a Chl-*a* ($r=0,76 \text{ } p<0,001$) e Feo-*a* ($r=0,52 \text{ } p<0,01$), a média de cada variável (Chl-*a* e Feo-*a*) para esta massa de água foi de $7,3 \pm 4 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ e $3,6 \pm 1,6 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$, respectivamente (tabela 6). Forte correlação foi observada entre a PPL e o silicato ($r=0,78 \text{ } p<0,01$) e com a PAR ($r=0,80 \text{ } p<0,001$) nas águas de superfície, indicando que a disponibilidade da luz é um fator regulador importante para os organismos fixadores de carbono para esta massa de água, provavelmente diatomáceas. As maiores concentrações da biomassa fitoplanctônica foram também observadas nesta massa de água no período de verão ($13,7 \pm 8,9 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$) (tabela 6) e se correlacionaram positivamente com a PPL ($r=0,61 \text{ } p<0,05$). A taxa de fixação do C na luz nas águas de haloclina no verão ($199,8 \pm 121,2 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$) (Fig. 8), foram próximas as observadas nas águas de superfície, porém esta massa de água não esteve correlacionada com nenhuma variável abiótica e biótica.

3.3.4 Fixação do Carbono no Escuro

No escuro, as taxas de incorporação do C diminuíram do verão ($14,1 \pm 9,1 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$) para o inverno ($5,2 \pm 2,0 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$), com o máximo observado nas águas de fundo anóxicas do verão ($35,1 \pm 40,4 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$) (Fig. 8). Em relação à fixação total, a fração escura representou $11,7 \pm 17\%$ desta. A contribuição mais alta, em média $21 \pm 14\%$, ocorreu nas águas de fundo do verão, quando a zona fótica ($<1\%$) não atingiu estas águas. Isto pode ser verificado pela correlação inversa entre a fixação no escuro e a PAR ($r=-0,53 \text{ } p<0,05$). O COD também apresentou correlação com a PPD para esta massa de água ($r=0,60 \text{ } p<0,05$). Nas águas de haloclina, a incorporação do C se correlacionou positivamente com o COD ($r=0,47 \text{ } p<0,05$) e com a T° ($r=0,70 \text{ } p<0,01$), as maiores taxas foram observadas no inverno representando $4,5 \pm 1,0\%$ da incorporação total. Curiosamente, a incorporação no escuro do C nas águas de superfície se correlacionou fortemente com o COP ($r=0,79 \text{ } p<0,001$) e Chl-*a* ($r=0,91 \text{ } p<0,001$), no verão as taxas de PPD prevaleceram, representando $6,6 \pm 3,7\%$ da fixação total.

Figura 8 - Distribuição da utilização aparente do oxigênio (AOU%), pressão parcial do CO₂ na coluna d'água (pCO₂ μ atm), carbono inorgânico dissolvido (CID μ M), carbono orgânico total (COT μ M), carbono orgânico dissolvido (COD μ M), carbono orgânico particulado (COP μ M), fixação do carbono no claro (PPL $\text{mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$) e fixação do carbono no escuro (PPD $\text{mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$) nas águas de superfície, haloclina e fundo na região central da LC (SC) em 2014. Os períodos estão representados em dias.





Fonte: Autor, 2015

3.3.5 Variáveis Físico-Químicas e Nutrientes

A estratificação física da coluna d' água, indicada pela salinidade, e a incidência da radiação PAR (em %) foram determinantes para a formação dos eventos anóxicos na CCL, observadas pela correlação inversa entre estas variáveis e a concentração de oxigênio (OD) (tabela 5). A análise de variância reforçou esta condição, demonstrando diferença espacial significativa entre salinidade, OD e PAR ($p < 0,001$ $n=9$). Soma-se a isto, que o estoque do carbono orgânico dissolvido na água de fundo aparece como importante fator para o desenvolvimento desta condição redutora devido a uma correlação inversa com o OD ($r = -0,51$ $p < 0,05$) e PAR ($r = -0,52$ $p < 0,05$) (tabela 5).

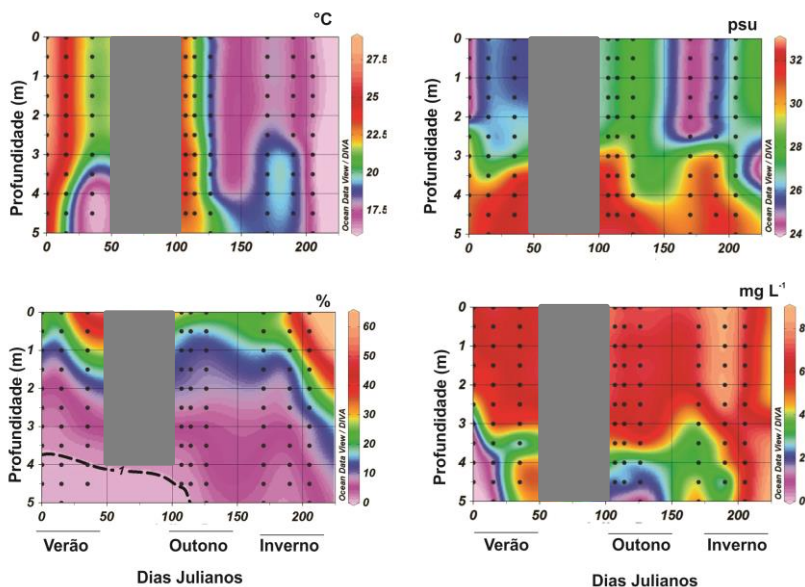
Tabela 5 - Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre as variáveis físico-químicas determinantes para os eventos de hipoxia e/ou anoxia na região central da LC (SC).

Variáveis	OD	PAR
PAR	+ 0,66 ^b	
Salinidade	- 0,67 ^b	- 0,88 ^b
COD	- 0,60 ^a	- 0,71 ^a
^a $p < 0,05$; ^b $p < 0,001$		

Fonte: Autor, 2014.

Águas hipóxicas e/ou anóxicas foram encontradas nos dias 21/1 e 5/2 (verão) e 27/5 (outono). As maiores concentrações de OD ($7,5 \pm 0,8 \text{ mg L}^{-1}$) foram verificadas nas águas de superfície durante o inverno (Fig. 9). Em média, a temperatura da água foi de $23 \pm 4^\circ\text{C}$ no verão, $21,7 \pm 1,7^\circ\text{C}$ no outono e $18 \pm 1,2^\circ\text{C}$ no inverno (Fig. 9), apresentando uma diminuição significativa ($n=9$ $p < 0,001$) ao longo dos períodos amostrados. A salinidade variou de $25,3 \pm 0,7$ (águas de superfície no verão) a $32 \pm 0,7$ (águas de fundo no outono, Fig. 9). No verão, as águas de superfície apresentaram a maior incidência da luz ($27 \pm 8,6\%$), porém a zona eufótica não atingiu as águas de fundo. Nas águas de fundo, durante o inverno, foi registrada a maior incidência de luz ($3 \pm 1,2\%$) (Fig. 9). Os valores de UAO variaram de -6,8 a 99,7%. Saturação de OD foi verificada somente nas águas de superfície dos dias 8/5 (outono) e 30/7 (inverno). As demais massas de água sempre demonstraram insaturação do gás (Fig. 8).

Figura 9 - Perfil da distribuição da temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidade (PSU), PAR (%) e oxigênio dissolvido (mg L^{-1}) a cada 0,5 (m) da coluna d' água na região central da LC (SC) em 2014. Os períodos estão representados em dias julianos. A linha tracejada representa o limite da zona eufótica.



Fonte: Autor, 2014.

Entre o nitrogênio inorgânico dissolvido (NID), o amônio foi a forma predominante no sistema, correspondendo 76% do NID total. Em média, a concentração do NH_4^+ foi de $2 \pm 1 \mu\text{M}$ no verão, aumentando para o outono ($3,4 \pm 2,7 \mu\text{M}$) e inverno ($6,3 \pm 5,2 \mu\text{M}$) (tabela 6). As concentrações de nitrato ($0,5 \pm 0,1 \mu\text{M}$) e de fosfato ($0,1 \pm 0,04 \mu\text{M}$) foram iguais para os períodos de verão e outono, respectivamente. No inverno a concentração destes nutrientes foi duas vezes maior ($1,2 \pm 0,5$ e $0,2 \pm 0,1 \mu\text{M}$) (tabela 6). Em relação ao silicato (SiO_2), as maiores concentrações

foram observadas nas águas de fundo durante o inverno (6,7 ± 5,4 µM) (tabela 6).

Tabela 6 - Concentração média (±dp) de nitrato (NO3⁻), amônio (NH4⁺), fosfato (PO4³⁺), silicato (SiO2), razão N/P, Cloro-a (µg L⁻¹) e Feo-a (µg L⁻¹) nas águas de superfície (S), haloclina (H) e fundo (F) da região central da LC (SC) nos períodos de verão, outono e inverno de 2014.

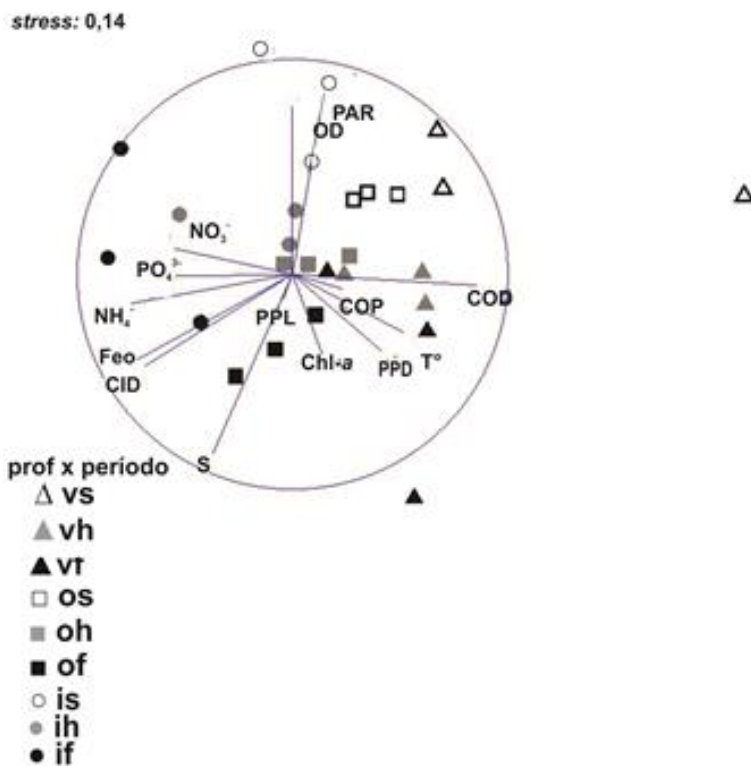
Variáveis prof (m)	Verão			Outono			Inverno		
	S	H	F	S	H	F	S	H	F
NO3 ⁻ (µM)	0,5±0,1	0,6 ± 0,1	0,5 ± 0,1	0,5 ± 0,01	0,5 ± 0,1	0,7 ± 0,1	1,4 ± 0,5	0,7 ± 0,2	1,3 ± 0,2
NH4 ⁺ (µM)	1,0 ± 0,3	2,3 ± 1,1	2,4 ± 0,7	0,8 ± 0,4	4,5 ± 2,7	4,9 ± 2,1	5,5 ± 3,1	8,5 ± 7,6	4,9 ± 2,3
PO4 ³⁺ (µM)	0,1 ± 0,1	0,1 ± 0,1	0,1 ± 0,1	0,01 ± 0,01	0,1 ± 0,1	0,1 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,3 ± 0,1
SiO2 (µM)	3,8 ± 2,9	1,7 ± 0,7	1,4 ± 0,5	0,01 ± 0,01	0,1 ± 0,1	0,1 ± 0,1	1,0 ± 0,5	1,6 ± 1,1	6,7 ± 5,4
N/P	14 ± 4	29,± 2	29 ± 7	75 ± 51	49 ± 23	42 ± 15	49 ± 39	60 ± 58	30 ± 19
Chl-a	13,7± 9,0	5,6 ± 2,6	6,6 ± 1,4	3,0 ± 0,9	7,1 ± 0,6	7,5 ± 2,9	4,9 ± 3,9	5,4 ± 3,6	7,8 ± 5,9
Feo	0,4 ± 0,6	1,3 ± 0,2	2,8 ± 1,3	1,3 ± 0,1	2,6 ± 0,6	4,2 ± 1,7	2,5 ± 0,3	2,9 ± 0,5	3,9 ± 1,6

Fonte: Autor, 2014.

3.3.6 Análises Estatísticas

Segundo a análise de escalonamento multidimensional (MDS), observou-se diferença espacial (profundidade), no eixo superior-inferior do gráfico, e temporal (períodos), no eixo da esquerda-direita, neste estudo. O OD e a PAR incidente na coluna d' água foram as variáveis que melhor se relacionaram com a águas de superfície em todos os períodos. As variáveis mais significativas e que melhor representaram o período de verão foram a temperatura (T), COD, COP e a fixação do C no escuro (PPD), bem como o OD e a PAR. As águas de haloclina demonstraram uma transição entre as amostras de superfície e do fundo. Os períodos de outono e inverno foram melhor representados pela salinidade, CID e Feo-a. Os nutrientes se relacionaram melhor com o inverno. As águas de fundo se relacionaram com a fixação do C no claro (PPL) e no escuro (PPD), COP, CID, salinidade e Feo-a.

Figura 10 - MDS entre as variáveis físico-químicas, químicas e biológicas das amostragens realizadas em 3 profundidades: superfície (branco), haloclina (cinza) e fundo (preto) no verão (▲), outono (■) e inverno (●) na Região Central da LC (SC) em 2014.



Fonte: Autor, 2015.

3.4 DISCUSSÃO

A variabilidade da dinâmica e fixação de carbono na CCL é complexa devido aos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem neste sistema lagunar. Em ecossistemas situados entre a interface continente-oceano, a mistura natural das águas (doces e marinhas) e as ações antropogênicas influenciam consideravelmente os processos físicos e biogeoquímicos, principalmente as taxas de produção e mineralização e a distribuição e fluxo do carbono (Gattuso et al., 1998). A produção primária em sistemas costeiros é dependente da disponibilidade de luz, qualidade da água, processos biogeoquímicos, incluindo fluxos de CO_2 na interface ar-água, acúmulo de carbono orgânico e produção secundária (Cloern, 1996; Caffrey, 2004; Cloern et al., 2014; Galegos, 2014). No presente estudo, a luz incidente na coluna d' água e a biomassa fitoplanctônica foram os principais fatores reguladores da PPL nas águas de superfície em todos os períodos, como demonstrado em outros estudos deste sistema (Fonseca, 2004; Fontes et al., 2011).

A dinâmica da PPL na água superficial teve forte influência na absorção de CO_2 da atmosfera e diminuição da $p\text{CO}_2$ na água. Os fluxos de CO_2 na interface ar-água e a $p\text{CO}_2$ na água em ecossistemas marinhos são regulados por diversos fatores tais como: processos físicos (temperatura e salinidade), processos oceanográficos (ventos e troca de massas de água), taxas de produção e mineralização da matéria orgânica, concentração de CID na coluna d' água, precipitação e dissolução do CaCO_3 e tempo de residência das águas (Cai et al., 2003; 2013 ; Borges et al., 2006;). Assumindo os valores

negativos de fluxos encontrados neste estudo, foi possível concluir que a CCL agiu como fraco sumidouro de CO_2 . Porém, é importante lembrar que as trocas de CO_2 ar-água e a pCO_2 nunca foram medidas na LC e o balanço deste gás em escala nictemeral ainda é necessária para compreender se o sistema age como fonte ou sumidouro de CO_2 . No entanto, os valores médios de fluxos observados neste estudo ($-0,5 \pm 0,4$ a $-0,8 \pm 0,3$ $\text{mmol C m}^{-2} \text{d}^{-1}$) foram próximos aos fluxos encontrados durante o inverno na costa sul do Brasil de $-1,1 \pm 0,9$ $\text{mmol C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (Ito et al., 2005), no Golfo de Cádiz (Espanha) que foi de $-1,5 \pm 0,8$ $\text{mmol C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ no inverno (Ribas-Ribas et al, 2010) e no estuário de Guadalquivir no período de primavera (Espanha) de $-0,7 \pm 6,9$ $\text{mmol C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (Flecha et al., 2014). Estes autores associaram as trocas de CO_2 da atmosfera com a velocidade dos ventos que influenciam diretamente a transferência do gás na interface ar-água e com a temperatura, a qual reflete na solubilidade do CO_2 . Na região costeira de Skagerrak (Europa), a qual agiu como forte sumidouro de CO_2 (máximo de $-25,2$ $\text{mmol C m}^{-2} \text{d}^{-1}$) além da temperatura, a elevada taxa de produção primária foi o principal fator regulador dos fluxos de CO_2 na interface ar-água e da pCO_2 nas águas superficiais (Hjalmarsson et al., 2010). Assim, a caracterização da CCL como sumidouro de CO_2 em todos os períodos amostrais pode estar relacionada aos processos biológicos (biomassa fitoplanctônica e taxas de fixação do C) e a velocidade dos ventos atuante no sistema, já que a turbulência gerada pelo *stress* dos ventos aumenta a difusividade do gás.

Em relação ao UAO, os valores negativos encontrados nas águas de superfície foram compatíveis aos fluxos de CO_2 medidos no sistema. Ou seja, a supersaturação de OD que caracteriza o sistema como autotótrofico está associada à produção primária e fixação de CO_2 , a qual promove a instauração deste gás e favorece o seu fluxo da atmosfera para a água. Importante ressaltar, que estudos realizados na Baía de Bengala (Índia), na Baía de Palma (Espanha) e na plataforma leste do mar da China reportaram que as trocas de CO_2 com a atmosfera não estiveram associadas diretamente ao estado metabólico nas águas de superfície (Akhand et al., 2013; Borges et al., 2006; Chou et al., 2009). No presente estudo, quando as águas de haloclina e fundo foram consideradas, a insaturação de OD esteve presente em todos os períodos do estudo, concomitante com os maiores valores da $p\text{CO}_2$, demonstrando que os processos de mineralização (heterotrofia) da matéria orgânica excederam os de produção. Chou et al. (2013), observaram que a fixação do C pelos produtores primários nas águas de superfície do sistema Changjiang (mar leste da China) reduziram a $p\text{CO}_2$ e as concentrações de CID e que a elevada taxa de produção na superfície contribuiu para uma maior deposição de matéria orgânica nas águas de fundo, indicando forte acoplamento entre a PP superficial e a mineralização na água de fundo. Estes autores concluíram que a estratificação da coluna d' água isola as águas de fundo dificultando as suas trocas de O_2 e CO_2 com a atmosfera, resultando em um forte

gradiente de UAO, CID e $p\text{CO}_2$, fato também observado no presente estudo.

Além dos fluxos de CO_2 na interface, a PPL na água de superfície esteve associada às concentrações de COD e COP, os quais decresceram a concentração do verão 3 vezes para o outono e 5 vezes para o inverno. Estas variáveis também se correlacionaram com a clorofila fitoplanctônica. Ou seja, a dinâmica do carbono na água de superfície da CCL está associada à comunidade fitoplanctônica, tanto ao processo de PP como ao estoque da sua biomassa. Em uma laguna tropical em Taiwan durante o verão, Hsieh et al. (2012) reportaram que a elevada carga de carbono orgânico dissolvido (COD) foi produzida devido ao crescimento do fitoplâncton, o qual foi dependente da disponibilidade da luz, de nutrientes e da elevada concentração de Chl-a. Este fato também foi observado na CCL, quando a elevada PPL no verão ($208,8 \pm 59,2 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$) esteve associada aos máximos de COD ($313,1 \pm 38,6 \text{ }\mu\text{M}$) desta massa de água e aos máximos de COP ($722,6 \pm 664,1 \text{ }\mu\text{M}$) de todo o estudo. Ressalta-se que a água de superfície no verão foi a única a apresentar a razão NP ideal para o fitoplâncton. Nos demais períodos amostrais, quando observou-se forte limitação de P para a PP, a água de superfície apresentou as menores PP na CCL, em comparação a água de haloclina e de fundo.

Apesar da diminuição da luz entre a água de superfície e de haloclina no verão ter sido de 13 vezes (onde observou-se o limite da zona eufótica) e a concentração de OD ter decaído para $2,4 \pm 0,8 \text{ mg L}^{-1}$, a PPL manteve-se a mesma ($199,8 \pm 121,3 \text{ mg}$

$\text{C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$) quando comparada a PPL da água superficial. Assim, espera-se que um grupo de produtor primário adaptado a menor incidência de luz esteja contribuindo com a PPL na haloclina. As cianobactérias são microrganismos fotossintéticos que dispõem de adaptações de aquisição de luz movendo-se rapidamente pela coluna d' água em busca de luminosidade e também por atuarem como microrganismos quimiossintetizantes, devido aos glóbulos de enxofre produzidos na fotossíntese que são capazes de fixar o CO_2 em condições de baixa ou ausência de luz e de oxigênio (Paerl, 1988; Casamayor, 2008). Fontes e Abreu (2009) observaram um aumento na abundância do bacterioplâncton, principalmente das cianobactérias, durante o período de verão na LC, em resposta a maior temperatura das águas e incidência da luz, demonstrando que estes microrganismos habitam sistemas em diferentes condições de luz (elevada, baixa ou ausência). Outra possibilidade é que as bactérias anaeróbicas anoxigênicas fototróficas (AnAnP) tenham contribuído para a elevada taxa de fixação de C encontrada na haloclina da CCL, já que estas conseguem viver em ambientes com baixo nível de oxigênio e de luz (Cottrell et al., 2005). Fontes et al. (2011) encontraram que o aumento do Bchl-*a* (bacterioplâncton) esteve relacionado com o declínio da incidência da luz nas águas de fundo da CCL e concluíram que as bactérias AnAnP tenham sido as responsáveis pelas elevadas taxas de fixação do CO_2 (máximo de $220 \text{ mg C m}^{-3} \text{ d}^{-1}$) no sistema, o que já foi escrito também para alguns lagos estratificados que apresentavam condições hipóxicas

(Casamayor, 2008), corroborando com o observado no presente estudo.

Já na água de fundo no verão, que estava abaixo da zona fótica e em condições de hipoxia, as taxas de PPL observadas foram as menores do estudo, porém, a PPD dominou e foi o triplo das demais massas de água deste período. As bactérias quimiossintetizantes, adaptadas a ausência de luz e condição anóxica, reduzem os compostos inorgânicos para obter energia para a fixação do CO_2 e representam uma importante fonte autóctone de matéria orgânica em sistemas aquáticos estratificados (Dijkhuizen, L. and Harder, W. 1984; García-Cantizano et al., 2005). Nas condições de hipoxia e/ou anoxia e ausência de luz observada na CCL, esses organismos parecem ter sido os responsáveis pelos processos de fixação de C no escuro na água de fundo do verão. García-Cantizano et al. (2005) concluíram que a maior parte da fixação de C em um lago com interface óxica-anóxica na Espanha foi devida a incorporação no escuro. Além disso, tem sido relatado que em sistemas marinhos a incorporação do C no escuro contribui significativamente para a absorção total do C, entre 30 a 60% (Casamayor, 2008). As taxas de fixação do C no escuro ainda não tinham sido relatadas na CCL até o presente estudo, sendo importantes em vista das mudanças globais, onde o aumento da temperatura e da matéria orgânica proveniente da urbanização poderá expandir ainda mais as zonas anóxicas em sistemas costeiros estratificados, como indicado por Rabalais et al. (2010).

No período de outono e inverno, as taxas de fixação do C na luz nas águas de fundo foram as maiores de todo o estudo, concomitante com as maiores concentrações de CID, maior zona fótica e as menores concentrações de COD e COP. Devido à correlação entre a PPL com a Chl-*a* e a Feo-*a*, mais uma vez foi demonstrado que a comunidade fitoplanctônica esteve associada com a PPL nas águas de fundo para ambos os períodos, outono e inverno. A PPL também esteve associada à disponibilidade de luz, enquanto que a concentração de nutrientes não se relacionou significativamente com a produção do C neste estudo. Durante o período de inverno, a concentração da luz foi menor em comparação ao verão e outono, porém, a zona fótica atingiu as águas de fundo devido a menor turbidez da coluna da água. No estuário Tagus, Portugal, que apresenta elevada turbidez devido à intensa urbanização no entorno, a fixação do C foi regulada pela disponibilidade da luz, ou seja, quando a zona fótica atingiu a coluna d' água, em comparação com a disponibilidade de nutrientes (Gameiro et al., 2011). Curiosamente, as águas de fundo e de haloclina apresentaram elevadas concentrações de CID, mesmo sob elevadas taxas de PPL, fato que pode estar relacionado com o processo de mineralização da matéria orgânica (MO), o qual predomina no outono e inverno e também pelas águas de fundo apresentarem as maiores salinidades, acarretando em maior concentração de íons carbonato.

O acúmulo de COD foi regulado pela produção primária e pela atividade bacteriana, conectada pela eficiente bomba

biológica observada no verão. De Vittor et al. (2008) observaram que a distribuição do COD foi caracterizada sazonalmente, com perfis verticais homogêneos no inverno e com diferenças significativas entre as profundidades no verão, devido a estratificação termal. O fitoplâncton que não é predado na coluna d' água é exportado para o fundo, onde é degradado pela comunidade bacteriana ou preservado nos sedimentos, resultando ao longo do tempo em elevada concentração de matéria orgânica (Kujawinski, 2011; Canuel et al., 2012). As condições de hipoxia nas águas de fundo da laguna de Taiwan (Hsieh et al, 2012) estiveram associadas ao carbono orgânico retido nos sedimentos e a estratificação física da coluna d' água, devida a baixa turbulência física. Neste estudo, no período de verão foram observados os maiores índices de estratificação física (De Barros et al., em prep.), a maior concentração de carbono orgânico e a presença de eventos de hipoxia e anoxia nas águas de fundo em todas as amostragens. A correlação positiva encontrada entre o carbono orgânico das águas de superfície e fundo indicou um possível acoplamento entre essas massas de água, sendo que a concentração de COT na superfície foi quase o dobro da concentração observada no fundo.

A quantidade e a qualidade da MO também parece ser importante para gerar a zona hipóxica observada no verão. A comunidade bacteriana (aeróbias e anaeróbias) utiliza o oxigênio dissolvido no meio para degradar a elevada carga de MO depositada nas águas de fundo, principalmente o carbono

orgânico lábil, por ser facilmente digerido. Se o oxigênio for somente consumido e não fornecido as águas de fundo pelos processos físicos (mistura vertical, troca de massas de água e processos de advecção) ou biogeoquímicos (como a produção primária) eventos de hipoxia e/ou anoxia se desenvolverão (Rabalais, 2010). Isto justifica a ocorrência de anoxia na CCL nas duas primeiras amostragens de verão, contudo, no dia 25/2 as águas de fundo apresentaram condições óxicas ($4,8 \text{ mg L}^{-1}$). Gale et al. (2006) demonstraram em seu estudo que as concentrações do oxigênio dissolvido aumentaram nas águas de fundo do lago Smith (Austrália), quando houve entrada de águas oceânicas. Estes autores ainda relacionaram os níveis de OD com a força e frequência da estratificação da coluna d' água, como já observado para a CCL (Fontes e Abreu, 2009; Fontes et al., 2011; De Barros, em prep.). Espera-se também que a perda da fração lábil do COT produzido no verão, devido à mineralização bacteriana, esteja influenciando a diminuição da zona anóxica ou hipóxica na CCL. Isto pode ser corroborado pela sazonalidade já descrita para a LC, onde a MO produzida no verão é degradada no outono e inverno, período em que os nutrientes inorgânicos retornam para a coluna d' água (Fonseca e Braga, 2006; De Barros et al. em prep.). Ou seja, a fração lábil depositada no fundo e que estimula o crescimento bacteriano no verão, aqui observado, ou no pós-verão, como indicado por Fontes et al. (2011) pode limitar o crescimento desta comunidade quando já degradada, reduzindo esta população e, consequentemente, o decréscimo de OD.

Mesmo que as taxas de PPL nas águas de fundo no outono e inverno tenham sido as mais elevadas do estudo, a concentração do COD nesta massa de água decresceu 3 X em comparação ao verão, enquanto o COP decresceu a metade. A permanência do COP no sistema pode ser um indicativo de matéria orgânica refratária, a qual é difícil de ser consumida, pois requer de alta atividade enzimática para ser hidrolisada (Hopkinson and Vallino, 2005). Por mais que a fixação do C tenha contribuído para a produção do COD e COP no outono e inverno, este deve ter sido prontamente retirado do sistema, sendo consumido tanto pela comunidade bacteriana quanto pela produção secundária. Freire (com pessoal) encontrou no canal da Barra da Lagoa, que liga a CL ao mar, grandes quantidades de larvas de zooplâncton sendo exportadas da laguna para o mar adjacente, sugerindo que esses organismos agem como via de exportação do carbono orgânico desta laguna. Ressalta-se que a água de fundo se encontrava óxica neste período, não limitando a presença de organismos heterotróficos aeróbios e favorecendo o acoplamento entre a produção primária e a produção secundária na LC. A diminuição da MO, principalmente no inverno, coincidiu com a presença de águas óxicas em toda a coluna d' água e também com os menores índices de estratificação (De Barros et al. em prep.), evidenciando que além dos processos físicos, a quantidade de matéria orgânica nas águas de fundo refletiu na variação dos níveis de OD no sistema.

Assim, a dinâmica e fixação do C na CCL mostrou ser controlada principalmente por processos físicos (incidência de luz

e estratificação da coluna da água) e biológicos (produção primária e secundária). A produção primária aqui observada corrobora o estado mesotrófico do sistema e cujos valores estão próximos dos observados em 2001-2002 (Fonseca, 2004) e em 2007 (Fonte et al., 2011). Porém, a complexidade do sistema requer maiores estudos em relação à dinâmica do C, incluindo os fluxos de CO₂ na interface ar-laguna para acompanhar as consequências das mudanças globais, principalmente a expansão das zonas anóxicas e o aumento significativo da pCO₂.

REFERÊNCIAS

ABREU, P.C., ODEBRECHT, C., and GONZÁLEZ, A.: Particulate and Dissolved Phytoplankton Production of the Patos Lagoon Estuary, Southern Brazil: Comparison Of Methods And Influencing Factors, **J. Plankton Res**, 16(7): 737-753, 1984.

ASUMPÇÃO, D.T.G., TOLEDO, A.P.P., and D'AQUINO, V.A.: Levantamento Ecológico da Lagoa da Conceição (Florianópolis, Santa Catarina), In: Caracterização-Parâmetros Ambientais, **Ciência e Cultura**, 33 (8): 1096-1101, 1981.

AKHAND, A., CHANDA, A., DUTTA, S., MANNA, S., HAZRA, S., MITRA, D., RAO, K.H., DADHWAL, V.K.: Characterizing Air–Sea CO₂ Exchange Dynamics During Winter in the Coastal Water Off the Hugli-Matla Estuarine System in the Northern Bay of Bengal, India, **J Oceanogr**, 2009, doi 10.1007/s10872-013-0199-z.

BARRERA-ALBA, J.J., GIANESELLA S.M.F., MOSER, G. A. O., RICCI, F. P., FRAIZ-TOMA, A.E.: Anthropogenic Eutrophication Processes in a Well Preserved Subtropical Estuary. In: **Living Marine Resources and Coastal Habitats**, 1º ed, Gdansk, University of Technology-Eurocast, 91-98, 2006.

BENSON, B.B. and KRAUSE, D.J.: The Concentration and Isotopic Fractionation of Oxygen Dissolved in Freshwater and Seawater in Equilibrium With the Atmosphere, **Limnology and Oceanography**, 29 (3): 620-632, 1984.

BIANCHI, T. S.: Biogeochemistry of Estuaries. New York: **Oxford Univ. Press**, 706 pp., 2007.

BORGES, A.V., SCHIETTECATTE, L.S., ABRIL, G., DELILLE, B., GAZEAU, F.: Carbon Dioxide in European Coastal Waters, Estuarine, **Coastal and Shelf Science**, 70, 375–387, 2006.

BRANDINI, N.: **Variação Espacial e Sazonal da Produção Primária do Fitoplâncton em Relação às Propriedades Físicas e Químicas na Baía das Laranjeiras e Áreas Adjacentes (Complexo Estuarino Da Baía De Paranaguá-PR/BR)**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 85 pp., 2002.

CAFFREY, J. M.: Factors Controlling Net Ecosystem Metabolism in US Estuaries, **Estuaries**, 27, 90-101, 2004.

CAI, W.J.: Riverine Inorganic Carbon Flux and Rate of Biological Uptake in the Mississippi River Plume. **Geophys. Res. Lett.** 30: 1032, 2003.

CAI, W.J., CHEN, C.T., BORGES, A.: Carbon Dioxide Dynamics and Fluxes in Coastal Waters Influenced by River Plumes, In: Biogeochemical Dynamics at Large River-Coastal Interfaces: Linkages with Global Climate Change, edited by, Bianchi, T.S., Allison, M.A., and Cai, W.J., Publisher: **Cambridge University Press**, chapter 7 ,155-173, 2013.

CANUEL, E.A., CAMMER, S.S., MCINTOSH, H.A., and PONDELL, C.R.: Climate Change Impacts on the Organic Carbon Cycle at the Land-Ocean Interface, **Annu. Rev. Earth Planet. Sci**, 40, 685-711, 2012.

CASAMAYOR, E.O.: Carbon Dioxide Fixation in the Dark by Photosynthetic Bacteria in Sulfide-Rich Stratified Lakes with

Oxic–Anoxic Interfaces, **Limnol. Oceanogr.**, 53(4): 1193-1203, 2008.

CHAVEZ, F. P., MESSIÉ, M., and PENNINGTON, J. T.: Marine Primary Production in Relation to Climate Variability and Change, **Annu. Rev. Mar. Sci.**, 3, 227–260, doi:10.1146/annurev.marine.010908.163917, 2010.

CHEN, C.T.A., LIU, K.K., MACDONALD, R.: Continental Margin Exchanges, In: Fasham, M.J.R. (Ed.), **Ocean Biogeochemistry: A JGOFS Synthesis**, Springer, Berlin, 53-97, 2003.

CHOU, W.C., GONG, G.C., SHEU, D.D., JAN, S., HUNG, C.C., CHEN, C.C.: Reconciling the Paradox that the Heterotrophic Waters of the East China Sea Shelf Act as a Significant CO₂ Sink During the Summer Time: Evidence And Implications. **Geophysical Research Letters** 36, L15607, 2009, doi: 10.1029/2009GL038475.

CLOERN, J.E., FOSTER, S.Q., and KLECKNER, A.E.: Phytoplankton Primary Production the World's Estuarine-Coastal Ecosystems, **Biogeosciences**, 11, 2477-2501, 2014.

CLOERN J.E., KNOWLES, N., BROWN, L.R., CAYAN, D., and DETTINGER, M.D.: Projected Evolution of California's San Francisco Bay-Delta-River System in a Century of Climate Change. **PLoS One** 6 (9), doi: 10.1371, 2011.

CLOERN, J.E.: Our Evolving Conceptual Model of the Coastal Eutrophication Problem, **Marine Ecology**, 210, 223-253, 2001.

DIJKHUIZEN, L. and HARDER, W.: Current Views on the Regulation of Autotrophic Carbon-Dioxide Fixation via the Calvin Cycle in Bacteria. **J. Microbiol**, 50, 473-487, 1984.

DONEY, S.C.: The Growing Human Footprint on Coastal and Open-Ocean Biogeochemistry, **Science**, 328, 1512–1516, 2010.

ELDRIDGE, P.M. and ROELKE, D.L.: Origins and Scales of Hypoxia on the Louisiana Shelf, In: Importance of Seasonal

Plankton Dynamics and Rivers Nutrients and Discharge, **Ecological Modelling**, 221, 1028-1042, 2010.

ELDRIDGE, P.M. and MORSE, J.W.: Origins and Temporal Scales of Hypoxia on the Louisiana Shelf: Importance of Benthic and Sub-Pycnocline Water Metabolism, **Marine Chemistry**, 108, 159-171, 2008.

FARMER, C.T. and HANSELL, D.H.: Determination of Dissolved Organic Carbon and Total Dissolved Nitrogen in Sea Water, In: Guide to best practices for ocean CO₂ measurements, edited by, Dickson, A.G., Sabine, C.L., and Christian, J.R., **PICES** Special Publication, USA, 3, 191 pp., 2007.

FEELY, R.A., DONEY, S.C., COOLEY, S.R. Ocean Acidification: Present Conditions and Future Changes in a High- CO₂ World. **Oceanography**, (22) 4: 36 - 47, 2009.

FLECHA, S., HUERTAS, E.I., NAVARRO, G., MORRIS, E.P., RUIZ, J.: Air–Water CO₂ Fluxes in a Highly Heterotrophic Estuary. **Estuaries and Coasts**, Doi 10.1007/s12237-014-9923-1, 2014.

FONSECA, A. AND BRAGA, E.S.: Spatial and Seasonal Variation of Dissolved Inorganic Nutrients and Phytoplankton Biomass in the Pelagic System of the Conceição Lagoon, Southern Brazil, **J. Coast. Res.**, 39, 1229-1233, 2006.

FONTES, M.L.S. and ABREU, P.A.: A Vigorous Specialized Microbial Food Web in the Suboxic Waters of a Shallow Subtropical Coastal Lagoon, **Microbial Ecology**, 64, 334-345, 2012.

FONTES, M.L.S., SUZUKI, M.T., COTTRELL, M.T., and ABREU, P.C.: Primary Production in a Subtropical Stratified Coastal Lagoon, Contribution of Anoxygenic Phototrophic Bacteria, **Microbial Ecology**, 61, 223-237, 2011.

FONTES, M.L.S. and ABREU, P.A.: Spatiotemporal Variation of Bacterial Assemblages in a Shallow Subtropical Coastal Lagoon in Southern Brazil, **Microbial Ecology**, 58 (1): 140-153, 2009.

FONTES, M.L.S., CAVELLUCCI, R., LAURENTI, A., MACHADO, E.C., CAMARGO, M.G., and BRANDINI, N.: Detection of Environmental Impact on Variations in Dissolved Nutrients and Chl-A in the Conceição Lagoon, Florianopolis, SC, Brazil, **J Coast Res SI**, 39, 1407-1412, 2006.

GALLEGOS, C.L.: Long-Term Variations in Primary Production in a Eutrophic Sub-Estuary. I. Seasonal and spatial patterns, **Mar. Ecol. Prog. Ser.**, 502, 53-67, 2014.

GALE, E., PATTIARATCHI, C., RANASINGHE, R: Vertical Mixing Processes in Intermittently Closed and Open Lakes and Lagoons, and the Dissolved Oxygen Response, **Estuarine Coastal and Shelf Science**, 69, 205-216, 2006.

GAMEIRO, C., ZWOLINSKI, J., BROTAS, V.: Light Control on Phytoplankton Production in a Shallow and Turbid Estuarine System, **Hydrobiologia**, 669, 249-263, 2011.

GARCIA-CANTIZANO, J., CASAMAYOR, E.O., GASOL, J.M., GUERRERO, M., ALIÓ, P.: Partitioning Of CO₂ Incorporation among Guilds of Microorganisms in Lakes with Oxic–Anoxic Interfaces and Estimation Of In Situ Specific Growth Rates, **Microb. Ecol**, 50, 230–241, 2005.

GATTUSO, J.P., MACH, K.J., and MORGAN, G.: Ocean Acidification and its Impacts: An Expert Survey, **Climatic Change**, 117,725-738, 2013.

GATTUSO, J.P.: Carbon and Carbonate Metabolism in Coastal Aquatic Ecosystem, **Annu. Rev. Ecol. Syst.**, 29, 405-434, 1998.

GRAN, G. Determination of the Equivalence Point in Potentiometric Titrations-- Part II, **The Analyst**, 77, 661-671, 1952.

GRASSHOFF, K., EHRHARDT, M., KREMILING, K.: Methods of Seawater Analysis, **Verlag Chemie**, Weinheim, 419 pp., 1983.

GRUNDLE, D. S., TIMOTHY, D. A., and VARELA, D. E.: Variations of Phytoplankton Productivity and Biomass Over an Annual Cycle in Saanich Inlet, a British Columbia fjord, **Cont. Shelf Res.**, 29, 2257–2269, 2009.

HOPKINSON C.S., VALLINO, J.J.: Efficient Export of Carbon to the Deep Ocean through Dissolved Organic Matter. **Nature**, 433,142-45, 2005.

HJALMARSSON, S., CHIERICI, M., ANDERSON, L.G.: Carbon Dynamics in a Productive Coastal Region- The Skagerrak. **Journal of Marine Systems**, 82, 245-251, 2010.

HSIEH, W.C., CHEN, C.C., SHIAH, F.K., HUNG, J.J., CHIANG, K.P., MENG, P.J., FAN, K.S.: Community Metabolism in a Tropical Lagoon: Carbon Cycling and Autotrophic Ecosystem Induced by a Natural Nutrient Pulse. **Environmental Engineering Science**, 29(8): 776-782, 2012.

ITO, R.G., SCHNEIDER, B., THOMAS, H.: Distribution of Surface fCO₂ and Air–Sea Fluxes in the Southwestern Subtropical Atlantic and Adjacent Continental Shelf. **Journal of Marine Systems**, 56, 227-242, 2005.

KJERFVE B (1986) Comparative Oceanography of Coastal Lagoons, In: Estuarine variability, edited bay Wolf, D.A., **Academic Press**, New York, 63-81 pp., 1986.

KENNISH, M.J. AND PAERL, H.W.: Coastal lagoons, In: Critical habitats of Environmental Change, **CRC Marine Science Series Press**, New York, 539 pp., 2010.

KNOPPERS, B.A., OPITZ, S.S., DE SOUZA, M. P., and MIGUEZ, C.F.: The Spatial Distribution of Particulate Organic Matter and Some Physical and Chemical Water Properties in Conceição Lagoon, Santa Catarina, Brazil (July 19, 1982), **Arquivos de Biologia e Tecnologia**, 27 (1): 59-77, 1984.

LIBES, S. M.: Introduction to Marine Biogeochemistry, **Academic Press**, 928 pp, 2009.

LIN, H.J., HUNG, J.J., SHAO, K.T., KUO, F.: Trophic functioning and Nutrient Flux in a Highly Productive Tropical Lagoon, **Oecologia**, 129(3): 395-406, 2001.

LLORET, J., MARIN, A. MARÍN-GUIRAO, L.: Is Coastal Lagoon Eutrophication Likely to be Aggravated by Global Climate Change? **Estuarine, Coastal and Shelf Sciences**, 78, 403-412, 2008.

MEDINA-GOMEZ, I and HERRERA-SILVEIRA, J.A.: Primary Production Dynamics in a Pristine Groundwater Influenced Coastal Lagoon of the Yucatan Peninsula, **Continental Shelf Research**, 26(8): 971-986, 2006.

MELZENER, F., THOMSEN, J., KOEVE, W., OSCHLIES, A., GUTOWSKA, M.A., BANGE, H.W., HANSEN, H.P., and KÖRTZINGER, A.: Future Ocean Acidification Will be Amplified by Hypoxia in Coastal Habitats, **Mar Biol**, 160, 1875-1888, 2013.

MILDDDELBURG, J.J., LEVIN, L.A.: Coastal hipoxia and Sediment Biogeochemistry, **Biogeosciences**, 6, 1273-1293, 2009.

MOSER, G.A.O.: **Aspectos da Eutrofização no Sistema Estuarino de Santos: Distribuição Espaço Temporal de Biomassa e Produtividade Primária Fitoplanctônica e Transporte Instantâneo de Sal, Clorofila-A, Material em Suspensão e Nutrientes**. Tese de Doutorado, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 2002.

MUEHE, D. AND CARUSO GOMES, JR. F.: Batimetria e Algumas Considerações Sobre e Evolução Geológica da Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina, **GEOSUL**, Florianópolis, 4(7): 32-44, 1989.

NIXON, S.W.: Coastal Marine Eutrophication: A Definition, Social Causes, and Future Concerns, **Ophelia**, 41, 199-219, 1995.

NIXON, S.W.: Nutrients Dynamics, Primary Production and Fisheries Yields of Lagoons, **Oceanol. Acta**, 357-371, 1982.

Odebrecht, C. and Caruso Gomes, Jr. F.: Hidrografia e Matéria Particulada em Suspensão na Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil, **Atlântica**, Rio Grande, 9(1): 83-104, 1987.

PAERL, H. W.: Nuisance Phytoplankton Blooms in Coastal, Estuarine, and Inland Waters. **Limnol. Oceanogr**, 33: 823–847, 1988.

PARKER, A. E., KIMMERER, W. J., and LIDSTRÖM, U. U.: Reevaluating the Generality of an Empirical Model for Light-Limited Primary Production in The San Francisco Estuary, **Estuar. Coast**, 35, 930-942, doi: 10.1007/s12237-012-9507-x, 2012.

PIMENOV, N.V., ZYAKUN, A.M., PRUSAKOVA, T.S., LUNINA, O.N., IVANOV, M.V.: Application of ¹³C Mineral Carbon for Assessment of the Primary Production of Organic Matter in Aquatic Environments, **Microbiology**, 77, 224–227, 2008.

RABALAIS, N.N., DÍAZ, R.J., LEVIN, L., TURNER, R.E., GILBERT, D., AND ZHANG, J.: Dynamics and Distribution of Natural and Human-Caused Hypoxia, **Biogeosciences**, 7, 585-619, 2010.

RABALAIS, N.N., TURNER, R.E., DÍAZ, R.J., AND JUSTIĆ, D.: Global Change and Eutrophication of Coastal Waters, **Journal of Marine Science**, 66, 1528-1537, 2009.

RABALAIS, N.N., TURNER, R.E., WISEMAN, JR., AND BOESCH, D.F.: A Brief Summary of Hypoxia on the Northern Gulf of Mexico Continental Shelf, In: Modern and Ancient Continental Shelf Anoxia, edited by Tyson, R.V. and Pearson, T.H, 1985-1988, **Geological Society Publication** 58, London, 35-47, 1991.

RABALAIS, N.N.: **Eutrophication. In: The Global Coastal Ocean: Multiscale Interdisciplinary Processes, the Sea**, Edited by Robinson, A. R., McCarthy, J. and Rothschild, B.J., Harvard University Press, Cambridge, MA, 819-865, 2004.

RENAUD, M.: Hypoxia in Louisiana Coastal Waters During 1983 Implications for Fisheries, **Fish. Bull.**, 84, 19-26, 1986.

RIBAS-RIBAS, M., HERNÁNDEZ-AYÓN, J.M., CAMACHO-IBAR, V.F., CABELLO-PASINI, A., MEJIA-TREJO, A., DURAZO, R., GALINDO-BECT, S., SOUZA, A.J., FORJA, J.M., SIQUEIROS-VALÊNCIA, A.: Effects of Upwelling, Tides and Biological Processes on the Inorganic Carbon System of a Coastal Lagoon in Baja California. **Estuarine, Coastal and Shelf Sciences**, 95: 367-376, 2010.

SABINE, C. L., and FEELY, R.A.: The Oceanic Sink for Carbon Dioxide, In: Greenhouse gas sinks edited by Reay, D., Hewitt, N., Grace, J., and Smith, K., CABI Publishing: **Oxfordshire**, UK, 31-49, 2007.

SCHLITZER, R.: **Ocean Data View**, /<http://odv.awi.de>, 2009.

SIEGENTHALER, U. and SARMIENTO, J. L.: Atmospheric Carbon Dioxide and the Ocean, **Nature**, 365, 119–125, 1993.

SMITH, J., BURFORD, M. A., REVILL, A. T., HAESE, R. R., and FORTUNE, J.: Effect of Nutrient Loading on Biogeochemical Processes in Tropical Tidal Creeks, **Biogeochemistry**, 108, 359–380, 2012.

SOUZA SIERRA, M.M., SORIANO-SERRA, E.J., and SALIM, J.R.S.: Distribuição Espacial e Temporal dos Principais Nutrientes e Parâmetros Hidrológicos da Lagoa da Conceição, **An. Cient. UNALM**, 2, 19-32, 1987.

STRICKLAND, J.D.H. and PARSON, T.: A Practical Handbook of Seawater Analysis, **Fisheries Research**, Board of Can, 172 pp., 1972.

UMANI, S.F., MALFATTI, F., and PAOLA, D.N.: Carbon Fluxes in the Pelagic Ecosystem of the Gulf of Trieste (Northern Adriatic Sea), **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, 115, 170-185, 2012.

VAQUER-SUNYER, R. and DUARTE, C.M.: **Thresholds of Hypoxia for Marine Biodiversity**, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 105(40): 15452-15457, 2008.

WEISS, R. F.: Carbon Dioxide in Water and Seawater: The Solubility of a Nonideal Gas, **Marine Chemistry**, 2, 203-215, 1974.

YAMAGUCHI, Y., SATOH, H., AND ARUGA, Y.: Seasonal Changes of Organic Carbon and Nitrogen Production by Phytoplankton in the Estuary of River Tamagawa, **Mar. Pollut. Bull.**, 23, 723-725, 1991.

4 CONCLUSÃO FINAL

A CCL é uma região que apresenta estratificação física da coluna d' água permanente, cujo índice de estratificação diminuiu quando processos físicos, como intensidade dos ventos, e processos oceanográficos de intrusão de massas de águas adjacente atuaram no sistema. Os eventos de hipoxia e/ou anoxia foram sazonais e estiveram associados à estratificação física da coluna d' água, à ausência de luz e à quantidade e qualidade do carbono orgânico na água de fundo.

A distribuição dos nutrientes foi regulada pelos processos de produção e mineralização na coluna d' água. O sistema foi potencialmente limitante por fósforo para a produção primária fitoplanctônica e a forma de nitrogênio inorgânico dissolvido que predominou foi o amônio.

A PP variou verticalmente ao longo da coluna d' água, as maiores taxas de fixação do C no claro ocorreram nas águas de superfície no verão e nas águas de fundo no outono e inverno. A disponibilidade da luz e a biomassa fitoplanctônica foram as variáveis que melhor se correlacionaram com este processo, o qual foi o responsável pelo estoque de carbono orgânico nesta área de estudo. Este estoque decresceu do verão para o inverno, evidenciando sua mineralização e um melhor acoplamento entre a produção primária e secundária da CCL.

A CCL apresentou-se como mesotrófica com nítido gradiente de insaturação de $p\text{CO}_2$ nas águas de superfície e supersaturação na haloclina e fundo. Os fluxos de CO_2 na

interface ar-água estiveram associados à fixação do C pelos produtores primários, assim o sistema agiu como sumidouro deste gás.

REFERÊNCIAS

- ABRIL, G.; NOGUEIRA, M.; ETCHEBER, H.; CABEÇADAS, G.; LEMAIRE, E.; BROGUEIRA, M. (2002). Behavior of Organic Carbon in Nine Contrasting European Estuaries. **Est .Coast .Shelf. Sci.** 54 (2): 241-262.
- ABREU, P.C.; BIDDANDA, B.B.; & ODEBRECHT, C. (1992). Bacterial Dynamics of the Patos Lagoon Estuary, Southern Brazil (32-degrees-S, 52-degrees-W) - Relationship with Phytoplankton and Suspended Material. **Estuarine Coastal and Shelf Science**, 35(6): 621-635.
- ABREU, P.C.; ODEBRECHT, C.; GONZÁLEZ, A. (1994). Particulate and Dissolved Phytoplankton Production of the Patos Lagoon Estuary, Southern Brazil: Comparison of Methods and Influencing Factors. **J. Plankton Res.**, 16(7): 737-753.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL DE SANTA CATARINA (ABES/SC). (2000). **Lagoa da Conceição** – Diagnóstico Ambiental Preliminar. Florianópolis, SC. Brasil. 28 p.
- ARRIGO, K. R. & VAN DIJKEN, G. L. (2007). Interannual Variation in Air-Sea CO₂ Flux in the Ross Sea, Antarctica: A Model Analysis. **Journal of Geophysical Research**, Vol. 112, C03020.
- ASUMPÇÃO, D.T.G.; TOLEDO A.P.P. & D'AQUINO V.A. (1981). Levantamento Ecológico da Lagoa da Conceição (Florianópolis, Santa Catarina) I: Caracterização-Parâmetros Ambientais. **Ciência e Cultura**, 33 (8): 1096-1101.
- BATAGLION, G.A.; PUHL, P.R.; RAU, M.; DAMATTO, S.R.; MADUREIRA, L.S.A. (2012). Avaliação de Compostos Lipídicos em Ambiente Anóxico da Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina, Brasil. **Revista Virtual de Química**, 4(4): 474-489.
- BIANCHI, T.S. (2007). Biogeochemistry of Estuaries. New York, **Oxford University Press**, 706 p.

BILLEN, G; LANCELOT, C; MEYBECK, M. (1991). N, P, and Si Retention along the Aquatic Continuum from Land to Ocean. In: MANTOURA, R.F.C.; MARTIN, J.M.; WOLLAST, R. Ocean Margin process in Global Change. (1991). **John Wiley & Sons**, Chichester, 19-44.

BRICKER, S.; LONGSTAFF, B.; DENNISON, W.; JONES, A.; BOICOURT, K.; WICKS, C.; WOERNER, J. (2007). Effects of Nutrient Enrichment in the Nation's Estuaries: A Decade of Change. **National Estuarine Eutrophication Assessment Update**, 328 p.

CANUEL, E.A.; CAMMER, S.S.; McINTOSH, H.A.; PONDELLI, C.R. (2012). Climate change Impacts on the Organic Carbon Cycle at the Land-Ocean Interface, **Annu. Rev. Earth Planet. Sci**, 40: 685-711.

CARUSO, M. M. L. (1990). **O Desmatamento da Ilha de Santa Catarina de 1500 aos Dias Atuais** – 2^a ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 160 p.

CASAMAYOR, E.O.; GARCIA-CANTIZANO, J.; MAS, J.; PEDROS-ALIO, C. (2001). Primary Production in Estuarine Oxic/Anoxic Interfaces: Contribution of Microbial Dark CO₂ Fixation in the Ebro River Salt Wedge Estuary. **Marine Ecology-Progress Series**, 215: 49-56.

CHEN, C.T.A.; BORGES, A.V. (2009). Reconciling Opposing Views on Carbon Cycling in the Coastal Ocean: Continental Shelves as Sinks and Near-Shore Ecosystems as Sources of Atmospheric CO₂. **Deep-Sea Res**, 56: 578–590.

CLARKE, K. R.; WARWICK, R. M. (1994). **Change in Marine Communities: An Approach to Statistical Analysis and Interpretation**. Natural Environmental Research Council (UK), Plymouth, UK, 144p.

CLOERN, J. E. (2001). Our Evolving Conceptual Model of the Coastal Eutrophication Problem. **Marine Ecology**, 210: 223-253.

CRUZ, O. (1998). **A Ilha de Santa Catarina e o Continente Próximo; um Estudo de Geomorfologia Costeira.** Florianópolis, Editora da UFSC, 276p.

DA SILVA, S.; SAVI, M.; ROCHA, M. (2003) Chaosin Water Body Eutrophication. **XVII International Congress of Mechanical Engineering**, São Paulo, Brazil, 10-14 p.

De JONGE, V.N.; ELLIOT, M.; & ORIVE, E. (2002). Causes, Historical Development, Effects and Future Challenges of a Common Environmental Problem: Eutrophication. In: ORIVE, E.; ELLIOTT, and DE JONGE, V.N. (eds.), Nutrients and eutrophication in estuaries and coastal waters. **Hydrobiology Special Issue**, 475/476: 1-19.

DIAZ, R. J. & ROSENBERG, R. (2008). Spreading Dead zones and Consequences for Marine Ecosystems. **Science**, 321: 926-929.

DIAZ, R.J. (2001). Overview of Hypoxia Around the World. **Journal of Environmental Quality**, 30: 275-281.

DUTRA, S. J. **Caracterização Geoambiental da Bacia de Drenagem do Rio João Gualberto, Ilha de Santa Catarina, SC.** (1991). Monografia do curso de Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina 53 p.

ELDRIDGE, P.M. & ROELKE, D.L. (2010). Origins and Scales of Hypoxia on the Louisiana Shelf: Importance of Seasonal Plankton Dynamics and Rivers Nutrients And Discharge. **Ecological Modelling**, 221: 1028-1042.

FARMER, C.T. & HANSELL, D.H. (2007). Determination of Dissolved Organic Carbon and Total Dissolved Nitrogen in Sea Water in DICKSON, A.G.; SABINE, C.L.; CHRISTIAN, J.R. (Eds.) (2007). Guide to best practices for ocean CO₂ measurements. **PICES Special Publication 3**, 191 pp.

FONSECA, A. & BRAGA, E. S. (2006). Spatial and Seasonal Variation of Dissolved Inorganic Nutrients and Phytoplankton Biomass in the Pelagic System of the Conceição Lagoon, Southern Brazil. **J. Coast. Res.**, 39: 1229-1233.

FONSECA, A. L. (2004). **Variação Sazonal e Espacial das Características Hidroquímicas, dos Fluxos de Nutrientes e do Metabolismo na Interface Água-Sedimento da Lagoa da Conceição (SC, Brasil)**. Tese de doutorado, Universidade Federal de São Paulo, Brasil, 180 p.

FONSECA, A. L. O.; BRAGA, E.; EICHLER, B. B. (2002). Distribuição Espacial dos Nutrientes Inorgânicos Dissolvidos e da Biomassa Fitoplanctônica no Sistema Pelágico da Lagoa da Conceição, Santa Catarina, Brasil (setembro, 2000). **Atlântica**, Rio Grande, 24 (2): 69-83.

FONTES, M.L.S. (2004). **Breve Estudo Espaço-Temporal e de Impacto do Feriado de Carnaval e de Corpus Christi sobre Variáveis Ambientais nas Águas da Lagoa da Conceição, Florianópolis**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 133 p.

FONTES, M.L.S. & ABREU, P.A. (2009). Spatiotemporal Variation of Bacterial Assemblages in a Shallow Subtropical Coastal Lagoon in Southern Brazil. **Microbial Ecology**, 58 (1): 140-153.

FREYESLEBEN, L.M.C. (1979). **Aspectos Essenciais do Ritmo Climático de Florianópolis**. Trabalho Técnico. Universidade Federal de Santa Catarina, 49 p.

GARCIA-CANTIZANO, J.; & ALIÓ, P. (2001^a). Microbial primary production in marine oxic– anoxic interfaces: Main role of dark fixation in the Ebro River salt wedge estuary. **Mar. Ecol**, 215: 49–56.

GARCIA-CANTIZANO, J.; CASAMAYOR, E.O.; GASOL, J.M.; GUERRERO, M.; ALIÓ, P. (2005). Partitioning of CO₂ Incorporation among Guilds of Microorganisms in Lakes with

Oxic–Anoxic Interfaces and Estimation of in Situ Specific Growth Rates. **Microb. Ecol**, 50: 230–241.

GARCIA, A. A. (1999). **Diagnóstico Ambiental da Lagoa da Conceição e do Canal da Barra Através de Indicadores Físico-químicos dos Sedimentos de Fundo e dos Indicadores Sócio-ambientais**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 290 p.

GODOY, F. B. (2009). **Modelagem Hidrológico-Hidrodinâmica da Lagoa da Conceição – SC**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental, – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 91 p.

GODOY, F. B. (2007). **Caracterização Temática da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição – Florianópolis - SC**. Monografia (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

GÖNENÇ, I. E.; & WOLFLIN, J. P. (2005). Coastal Lagoons: Ecosystem Processes and Modeling for Sustainable Use and Development. **CRC Press**, Boca Raton, Florida, USA.

GRAY, J.S., WU, R.S.S., OR, Y.Y. (2002). Effects of Hypoxia and Organic Enrichment on the Coastal Marine Environment. **Marine Ecology Progress**, 238: 249-279.

HJALMARSSON, S.; CHIERICI, M.; ANDERSON, L.G. (2010). Carbon Dynamics in a Productive Coastal Region- The Skagerrak. **Journal of Marine Systems**, 82: 245-251.

JORGENSEN, E. (1996). Material Flux in the Sediment. In: Jorgensen B. & Richardsonk. (eds). **Coastal and estuarine studies**. American Geophysical Union, 115-135 p.

KELLING, C. D.; PIPER, S. C.; BACASTOW, R. B.; WAHLEN, M.; WHORF, T. P.; HEIMANN, M.; MEIJER, H. A. (2005).

Atmospheric CO₂ and ¹³CO₂ Exchange with the Terrestrial Biosphere and Oceans from 1978 to 2000: Observations and Carbon Cycle Implications. In: J.R. Ehleringer, 41 T.E. Cerling, and M.D. Dearing (eds.), A History of Atmospheric CO₂ and its effects on Plants, Animals, and Ecosystems, **Springer Verlag**, New York, 83-113.

KLINGEBIEL, A. & SIERRA DE LEDO, B. (1997). Étude Preliminaire des Marées Dans la Lagoa da Conceição, île de Santa Catarina (Brésil). **Aquat. Ocean**, 3: 129-140.

KNOPPERS, B. A.; OPITZ, S.S.; DE SOUZA, M. P.; MIGUEZ, C.F. (1984). The Spatial Distribution of Particulate Organic Matter and Some Physical and Chemical Water Properties in Conceição Lagoon; Santa Catarina, Brazil (July 19, 1982). **Arquivos de Biologia e Tecnologia**, 27 (1): 59-77.

KONÉ, Y.J.M.; ABRIL, G.; KOUADIO, K.N.; DELILLE, B.; BORGES, A.V. (2009). Seasonal Variability of Carbon Dioxide in the Rivers and Lagoons of Ivory Coast (West Africa). **Estuaries and Coasts**, 32 (2): 246-260.

KNOPPERS, B; MACHADO, E.C.; BRANDINI, N.; SOUZA, W.L. (2004). Sediment, Oxygen and Nutrient Fluxes in Three Estuarine Systems of SE Brazil. In: LACERDA, L.D.; SANTELLE, R.E.; DUURSMA, E.; ABRAÃO, J.J (eds). Facets of environmental geochemistry in tropical and subtropical environments. **Springer Verlag**, Berlin, 20: 1-22.

LEFEBVRE, S.; CLAQUIN, P.; ORVAIN, F.; VÉRON, B.; CHARPY, L. (2012). Spatial and Temporal Dynamics of Size-Structured Photosynthetic Parameters (PAM) and Primary Production (¹³C) Of Pico-And Nano-Phytoplankton in an Atol Lagoon. **Marine Pollution Bulletin**, 65: 478-489.

LEHRTER, J.C.; BEDDICK Jr, D.L.; DEVEREUX, R.; YATES, D.F.; MURRELL, M.C. (2012). Sediment-Water Fluxes of Dissolved Inorganic Carbon, O₂, Nutrients, and N₂ from the Hypoxic Region of the Louisiana Continental Shelf. **Biogeochemistry**, 109: 233-252.

LIBES, S. M. (2009). Introduction to Marine Biogeochemistry. **Academic Press**, 928 p.

LIBES, S.M. (1992). An Introduction to Biogeochemistry. New York, **John Wiley and Sons**, 734 p.

LISS, P.S. & MERLIVAT, L. (1986). Air- Sea Gas Exchange Rates: Introduction and Synthesis. In: BUAT-MERNÁRD, P. The Role Of Air-Sea Exchange In Geochemical Cycling. Boston. **D. Reidel Publishing Company**, 113-127.

LLORET, J.; MARÍN, A.; MARÍN-GUIRAO, L. (2008). Is Coastal Lagoon Eutrophication Likely to be Aggravated by Global Climate Change? **Estuarine, Coastal and Shelf Sciences**, 78: 403-412.

MEDINA-GOMEZ & HERRERA-SILVEIRA. (2006). Primary Production Dynamics in a Pristine Groundwater Influenced Coastal Lagoon of Yucatan Peninsula. **Cont. Shelf. Res.**, 26:971-986.

MELZNER, F.; THOMSEN, J.; KOEVE, W.; OSCHLIES, A.; GUTOWSKA, M.A.; BANGE, H.W.; HANSEN, H.P.; KÖRTZINGER, A. (2013). Future Ocean Acidification Will be Amplified by Hypoxia in Coastal Habitats. **Mar Biol**, 160: 1875-1888.

MENDONÇA, M. (2002). **A Dinâmica Têmporo-Espacial do Clima Subtropical na Região Conurbada de Florianópolis/SC**. Tese de Doutorado, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade Estadual de São Paulo, 343 p.

MCGLATHERY, K.J.; ANDERSON, I.C.; TYLER, A.C. (2001). Magnitude and Variability of Benthic and Pelagic Metabolism in a Temperate Coastal Lagoon. **Marine Ecology**, 216: 1-15.

MICHENER, R. & L. KAUFMAN. (2007). Stable Isotope Ratios as Tracers in Marine Food Webs. In: MICHENER, R. & LAJTHA, K. **Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science**. (2. Eds). Blackwell Publishing, 590p.

MONTEIRO, C.A.F. (1991). **Clima e Excepcionalismo: Conjecturas sobre o Desempenho da Atmosfera como Fenômeno Geográfico**. Florianópolis. Editora da UFSC, 233 p.

MUEHE, D. & CARUSO GOMES JR, F. (1989). Batimetria e Algumas Considerações Sobre a Evolução Geológica da Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina. **GEOSUL**. Florianópolis, 4(7): 32-44.

NIMER, E. (1966). Circulação Atmosférica do Brasil. Contribuição ao Estudo da Climatologia Dinâmica do Brasil. **Geogr.** 28 (3): 232-250.

NIXON, S.W. (1995). Coastal Marine Eutrophication: A Definition, Social Causes, and Future Concerns. **Ophelia**, 41: 199-219.

NEWTON, A.; ICELY, J. D.; FALCÃO, M.; NOBRE, A.; NUNES, J. P.; FERREIRA, J. G.; VALE, C. (2003). Evaluation of Eutrophication in the Ria Formosa Coastal Lagoon, Portugal. **Continental Shelf Research**, 23: 1945-1961.

ODEBRECHT, C.; CARUSO GOMES Jr. F. (1987). Hidrografia e Matéria Particulada em Suspensão na Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil. **Atlântica**, Rio Grande, 9(1): 83-104.

ODRESKI, L.F.R. (2012). **Influência Hidrológica nos Processos Hidrodinâmicos da Lagoa da Conceição- Florianópolis- SC**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 126 p.

OSPAR Commission. (2003). **OSPAR Integrated Report 2003 on the Eutrophication Status**. London, U.K.: OSPAR.

OVERMANN, J & GARCIA-PICHEL, F. (2006). The Phototrophic Way of Life. In: Dworkin, M.; Rosenberg, E.; Schleifer, K.H.; Stackebrandt, E. (ed.). **Prokaryotes. Ecophysiology and Biochemistry**, Springer New York, (2): 3: 32–85.

PEREIRA, M. L. M. (2004) **Estudo da Dinâmica das Águas do Canal da Barra – Barra da Lagoa – Florianópolis, SC.** Dissertação de Mestrado em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, 148 p.

PORTO-FILHO, E. (1993). **Sedimentometria e Algumas Considerações sobre a Biogeoquímica dos Sedimentos de Fundo da Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina.** Florianópolis. Dissertação de Mestrado em Geografia, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, 346 p.

RABALAIS, N.N.; DIAZ, R.J.; LEVIN, L.; TURNER, R.E.; GILBERT, D. & ZHANG, J. (2010). Dynamics and Distribution of Natural and Human-Caused Hypoxia. **Biogeosciences**, 7: 585–619.

RABALAIS, N.N.; TURNER, R.E.; DIAZ, R.J.; JUSTIC', D. (2009). Global Change and Eutrophication of Coastal Waters. **Journal of Marine Science**, 66: 1528-1537.

RABALAIS, N. N. (2004). **Eutrophication, Chapter 21. In The Global Coastal Ocean: Multiscale Interdisciplinary Processes.** The Sea, Ed by A. R. Robinson, J. McCarthy, and B. J. Rothschild. Harvard University Press, Cambridge, MA, 819–865.

RABALAIS, N.N. & TURNER, R.E. (2001). Hypoxia in the Northern Gulf of Mexico: Descriptions Causes and Change. In: Rabalais, N.N. & Turner, R.E. Coastal Hypoxia: Consequences for Living Resources and Ecosystems. **American Geophysical Union**, 1–36.

RABALAIS, N.N.; TURNER, R.E.; ROWE, G.T. (1994). Respiration Rates and Hypoxia on the Louisiana shelf. **Estuaries**, (17): 4: 862-872.

RABALAIS, N.N.; TURNER, R.E.; WISEMAN, Jr.; BOESCH, D.F. (1991). A Brief Summary of Hypoxia on the Northern Gulf of

Mexico Continental Shelf. In: TYSON, R.V.; PEARSON, T.H. Modern and Ancient Continental Shelf Anoxia- 1985-1988. Geological Society Publication 58. **The Geological Society**, London, 35-47.

REBOITA, M. S. (2008). **Ciclones Extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação Climática e Experimentos de Sensibilidade**. Tese de Doutorado em Meteorologia, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas IAGUSP, 359 p.

RIBAS- RIBAS, M.; SOBRINO, C.; DEBELIUS, B.; LUBIÁN, L.M.; PONCE, R.; GÓMEZ-PARRA, A.; FORJA J.M. (2013). Picophytoplankton and Carbon Cycle on the Northeastern Shelf of the Gulf of Cádiz (SW Iberian Peninsula). **Scientia Marina**, 49-62.

RIBAS-RIBAS, M.; HERNÁNDEZ-AYÓN, J.M.; CAMACHO-IBAR, V.F.; CABELLO-PASINI, A.; MEJIA-TREJO, A.; DURAZO, R.; GALINDO-BECT, S.; SOUZA, A.J.; FORJA, J.M.; SIQUEIROS-VALÊNCIA, A. (2010). Effects of Upwelling, Tides and Biological Processes on the Inorganic Carbon System of a Coastal Lagoon in Baja California. **Estuarine, Coastal and Shelf Sciences**, 95: 367-376.

SELUCHI, M. E.; CALBETE, N. O.; ROZANTE J. R. (2001). Análisis de Un Desarrollo Ciclónico en La Costa Oriental de América Del Sur. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 16 (1): 51-65.

SELMAN, M.; GREENHALGH, S.; DIAZ, R.; SUGG, Z. (2008). Eutrophication and Hypoxia in Coastal Areas: A Global Assessment of the State of Knowledge. Water Quality: **Eutrophication and Hypoxia Policy Note Series**, 1: 1-6.

SIEGENTHALER, U.; SARMIENTO, J. L. (1993). Atmospheric Carbon Dioxide and the Ocean. **Nature** 365 (6442): 119-125.

SIERRA DE LEDO, B.; SORIANO-SIERRA, E. J. (1999). Atributos e Processos Condicionantes da Hidrodinâmica na Lagoa da Conceição, SC, Brasil. In: SIERRA DE LEDO, B.;

SORIANO-SIERRA, E. J. (Eds.). **O Ecossistema da Lagoa da Conceição**. Florianópolis: NEMAR/CCB/UFSC. SDM/FEPEMA, 113-121.

SIERRA DE LEDO, B & E SORIANO-SIERRA. (1994). Atributos e Processos Condicionantes da Hidrodinâmica na Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina, Brasil. **ACIESP**, 2: 113-121.

SLAWYK, G.; COLLOS, Y.; AUCLAIR, J.C. (1977). Use of C-13 and N-15 Isotopes for Simultaneous Measurement of Carbon and Nitrogen Turnover Rates in Marine Phytoplankton. **Limnology and Oceanography** 22, 925–932.

SMITH, S. V.; SWANEY, D.P.; McMANUS L.T.; BARTLEY, J.D.; SANDEI, P.T.; McLAUGHLIN, C.J. (2003). Humans, Hydrology, and The Distribution of Inorganic Nutrient Loading to the Ocean. **Bio Science**, 53 (3): 235-245.

SOUZA, M.F.L., LONGHINI, C.M., SILVA, A.M., LENTINI, C.A.D. 2012. Ciclo do Carbono: Processos Biogeoquímicos, Físicos e Interações entre Compartimentos na Baía de Todos os Santos. **Rev. Virtual Quim** 4 (5): 566-582.

SOUZA SIERRA, M.M.; SORIANO-SERRA, E.J. & SALIM, J.R.S. (1987). Distribuição Espacial e Temporal dos Principais Nutrientes e Parâmetros Hidrológicos da Lagoa da Conceição. **An. Cient. UNALM**, 2: 19-32.

STECKBAUER, A.; DUARTE, C.M.; CARSTENSEN, J.; VAQUER-SUNYER, R.; CONLEY, D.J. (2011). Ecosystem Impacts of Hypoxia: Thresholds of Hypoxia and Pathways To Recovery. **Environmental Research Letters**, 12p.

STOW, C.A.; QIAN, S.S.; CRAIG, J.K. (2005). Declining Threshold for Hypoxia in the Gulf of Mexico. **Environmental Science and Technology**, 39: 716–723.

STRAMMA, L.; JOHNSON, G. C.; SPRINTALL, J.; MOHRHOLZ, V. (2008). Expanding Oxygen-Minimum Zones in the Tropical Oceans, **Science**, 320: 655-658.

TAKAHASHI, M., AND S. ICHIMURA. (1970). Photosynthetic properties and growth of photosynthetic sulfur bacteria in lakes. **Limnol. Oceanogr**, 15: 924–944.

THOMAS, H.; YANN, B.; KHALID, E.; De BAAR, H. J. W. (2004). Enhanced Open Ocean Storage of CO₂ from Shelf Sea Pumping. **Science**, 304 (5673): 1005-1008.

VAQUER-SUNYER, R. & DUARTE, C.M. (2008). **Thresholds of Hypoxia for Marine Biodiversity**. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 105(40): 15452-15457.

RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar, em medidas contínuas, como as condições atmosféricas e oceanográficas da região interferem na estabilidade da coluna da água da LC e na dinâmica de oxigênio da água de fundo;
- Medições nictemerais do fluxo do CO_2 e O_2 na interface ar-água ao longo de ciclos sazonais;
- Estimar os fluxos do O_2 , do CO_2 e dos nutrientes ao longo da coluna d' água;
- Quantificar as taxas de exportação do carbono orgânico da laguna para o mar adjacente;
- Compreender a estrutura da cadeia trófica, com uso de isótopos estáveis, em diferentes condições de oxirredução ao longo de toda a coluna da água, incluindo a comunidade da haloclina;
- Avaliar o papel das comunidades do fito- e bacterioplâncton na fixação clara e escura do C na laguna;
- Avaliar a contribuição dos efluentes domésticos no metabolismo da LC.

ANEXO A - Cálculo para Determinar a Fixação do C pelo Método do ^{13}C

Cálculo para determinar a fixação do C pelo método do ^{13}C (Pimenov et al., 2008).

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = (R_{\text{Na}_2\text{CO}_3} / R_{\text{std}} - 1) 1000\text{‰} = 8809023,8 \quad (1)$$

Onde,

$R_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = 99/1 = 99$ é a razão isotópica do carbonato utilizado para enriquecer as amostras;

$R_{\text{std}} = 0,0112372$ é a razão isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ no padrão internacional PDB;

A composição isotópica do carbono mineral ($\delta^{13}\text{C}_{\Sigma}$) após a introdução de $\text{Na}_2^{13}\text{CO}_3$ será calculada de acordo com a equação:

$$q_{\text{orig}} \delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}} + q_{\text{int}} \delta^{13}\text{C}_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = (q_{\text{orig}} + q_{\text{int}}) \delta^{13}\text{C}_{\Sigma} \quad (2)$$

ou

$$\delta^{13}\text{C}_{\Sigma} = (q_{\text{orig}} \delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}} + q_{\text{int}} \delta^{13}\text{C}_{\text{Na}_2\text{CO}_3}) / (q_{\text{orig}} + q_{\text{int}}) \quad (3)$$

Onde,

q_{orig} = a quantidade de carbono inorgânico dissolvido (CID) na amostra original;

$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ = a composição isotópica do carbono inorgânico dissolvido (CID) na amostra original;

q_{intr} = a quantidade introduzida de carbonato ^{13}C ;

$\delta^{13}\text{C}_{\text{Na}_2\text{CO}_3}$ = a composição isotópica do $\text{Na}_2^{13}\text{CO}_3$ introduzido, a qual foi calculada a partir da equação (1);

$\delta^{13}\text{C}_{\Sigma}$ = a composição isotópica do carbono mineral na mistura do carbono mineral do ambiente e a quantidade introduzida de $\text{Na}_2^{13}\text{CO}_3$;

A razão do carbono mineral incorporado na matéria orgânica durante o experimento será calculada de acordo com:

$$(1-x) \delta^{13}\text{C}_{\text{POC-O}} + x \delta^{13}\text{C}_{\Sigma} = \delta^{13}\text{C}_{\text{POC-I}} \quad (4)$$

ou

$$x = (\delta^{13}\text{C}_{\text{POC-I}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{POC-O}}) / (\delta^{13}\text{C}_{\Sigma} - \delta^{13}\text{C}_{\text{POC-O}}) \quad (5)$$

Onde,

X= a razão do carbono mineral incorporado durante a exposição do experimento;

O valor de $\delta^{13}\text{C}_{\Sigma}$ = as características da composição isotópica da mistura do carbono mineral do ambiente e introduzido $\text{Na}_2^{13}\text{CO}_3$, a qual será calculada de acordo com a equação (3);

$\delta^{13}\text{C}_{\text{POC-O}}$ = a composição isotópica na matéria orgânica particulada antes da introdução do carbonato ^{13}C (amostra inicial para cada profundidade);

$\delta^{13}\text{C}_{\text{POC- I}}$ = composição isotópica na matéria orgânica particulada após a exposição do experimento;

A taxa absoluta da incorporação do carbono mineral em carbono orgânico da biomassa dos fixadores de carbono (I) será calculada a partir da equação utilizada para a aplicação do método de radioisótopos para este processo:

$$I = xC / t \quad (6)$$

Onde,

X = a fração do carbono mineral incorporado na matéria orgânica durante a exposição do experimento;

C = concentração do carbono mineral na amostra;

t = tempo de exposição.